# Einsatz eines "robusten" optimalen Zustandsreglers mit Beobachter am Beispiel der Leistungsregelung eines Kernkraftwerks

DISSERTATION

zur

Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs
der

Abteilung für Elektrotechnik
an der Ruhr-Universität Bochum

von

Kyungsuk Jun
Pyongnam / Korea

Bochum 1982

# Einsatz eines "robusten" optimalen Zustandsreglers mit Beobachter am Beispiel der Leistungsregelung eines Kernkraftwerks

DISSERTATION

zur

Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs
der

Abteilung für Elektrotechnik
an der Ruhr-Universität Bochum

von

**Kyungsuk Jun**

Pyongnam / Korea

Bochum 1982

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung der Ruhr-Universität Bochum.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Unbehauen danke ich sehr herzlich für die zahlreichen Ratschlägen, die kritischen Bemerkungen und großzügige Förderung während der Durchführung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr. techn. K. H. Fasol danke ich für die Übernahme des Mitberichtes.

Mein Dank gilt auch allen meinen Kollegen, die mir Gelegenheit gaben zu zahlreichen fruchtbaren Diskussionen und Gesprächen. Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank Frau H. Hupp, Frau P. Kiesel und Frl. H. Vollbrecht für die schnelle und sorgfälige Reinschrift des Manuskriptes.

Bochum, im März 1982

Dissertation eingereicht am : 13. Januar 1982
Tag der mündlichen Prüfung : 19. Februar 1982
Referent : Prof. Dr.-Ing. H. Unbehauen
Korreferent : Prof. Dr. techn. K. H. Fasol

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549226_0021

# INHALTSVERZEICHNIS


| | Seite |
|---|---|
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Das Kernkraftwerk "SNR 300" | 4 |
| 2.1. Komponenten des Kernkraftwerks | 4 |
| 2.2. Kernkraftwerk als Regelstrecke | 6 |
| 3. Das mathematisch-physikalische Simulationsmodell | 10 |
| 3.1. Reaktor | 10 |
| 3.2. Dampferzeuger | 18 |
| 3.3. Zwischenwärmetauscher | 32 |
| 3.4. Turbogenerator und Rohrleitungen | 34 |
| 4. Das dynamische Verhalten des Kernkraftwerks | 37 |
| 4.1. Übergangsfunktionen | 37 |
| 4.2. Approximation der Übergangsfunktionen | 44 |
| 5. Das lineare mathematische Modell | 47 |
| 5.1. "Modell I" | 47 |
| 5.2. "Modell II" | 49 |
| 6. Die konventionelle Leistungsregelung des Kernkraftwerks | 51 |
| 6.1. Aufbau der konventionellen Leistungsregelung | 51 |
| 6.2. Regelverhalten | 57 |
| 7. Der Entwurf und die Erprobung eines optimalen Zustandsreglers mit Beobachter | 59 |
| 7.1. Optimaler Zustandsregler | 59 |
| 7.2. Erweiterung des optimalen Zustandsreglers durch Führungsgrößen- und Störgrößenaufschaltung | 61 |
| 7.3. Beobachter | 68 |
| 7.4. "robuste" Zustandsregelung | 70 |
| 7.4.1. Robuste Regelung ohne Strukturerweiterung | 71 |
| 7.4.2. Robuste Regelung durch Strukturerweiterung | 81 |

Seite

8. Simulationsergebnisse 87

9. Zusammenfassung 91

Literaturverzeichnis 93

Anhang 104

# 1. Einleitung

Für die Regelung komplexer technischer Prozesse werden noch vorwiegend konventionelle Regelungsstrukturen eingesetzt. Obwohl die moderne Regelungstheorie (Tou (1964), Athans und Falb (1966), Schulz und Melsa (1967), Kwakernaak und Sivan (1972)) bessere Ergebnisse zu versprechen scheint, sind bisher relativ wenige Untersuchungen und Anwendungsfälle in der Energietechnik bekannt. Die Ursache der verzögerten Einsätze liegt trotz des hohen Entwicklungsstands in der Geräte- und Prozeßrechentechnik vor allem darin, daß die Einsatzmöglichkeit und die Leistungsfähigkeit noch ungenügend erforscht sind.

Anfang der 70er Jahre wurde erstmals an energietechnischen Anlagen die Einsatzmöglichkeit des optimalen Zustandsreglers untersucht (Bjørlo, Grumbach und Josefsson (1970), Herbrik und Jamshidi (1972), Calović (1972)). Diese und die darauffolgenden Arbeiten wie Joyner und Mishra (1974), Dang van Mien, Godin und Miossec (1974), Harris (1974), Dettinger (1976) und Tye (1980) befaßten sich mit der Implementierung und Erprobung optimaler Zustandsregelungen, zum Teil mit Beobachter, die ausschließlich für Führungsgrößenregelung im kleinen Arbeits- bzw. Parameterbereich und für Störgrößenregelung ausgelegt waren. Größere Laständerung wurde durch den Einsatz adaptiver Regelverfahren ermöglicht (Moore und Schweppe (1972), Breznai und Sinha (1973), Irving und Dang Van Mien (1981)). Da die adaptive Regelung wesentlich größeren technischen Realisierungsaufwand erfordert, beschränkt sich die Einsatzmöglichkeit von vornherein auf relativ einfache Systeme bzw. diejenigen komplexen Systeme, die sich vereinfachen lassen, was wegen der Komplexität der zu regelnden Prozesse oft ohne Einbuße der Modellgenauigkeit nicht möglich ist.

In der vorliegenden Arbeit wird am Beispiel der Leistungsregelung eines Kernkraftwerks die bisher kaum genutzte Möglichkeit untersucht, mittels einer Empfindlichkeitsfunktion oder eines -Modells eine robuste Zustandsregelung mit Beobachter ohne Anpassung der Reglerparameter zu realisieren. Dabei werden die zusätzlichen

Freiheitsgrade, die entweder im Beobachter bereits vorhanden und frei vorgebbar sind oder durch eine Strukturerweiterung des Regelsystems entstehen, beim Regler- bzw. Beobachterentwurf im Sinne der Parameterunempfindlichkeit beeinflußt.

Im Kapitel 2 wird der Aufbau des Kernkraftwerks "SNR 300" in Kalkar erläutert und das Kraftwerk als Regelstrecke betrachtet. Ausgehend von allgemeingültigen physikalischen Gesetzen - Erhaltungssätzen von Masse, Energie und Impuls - wird im Kapitel 3 das mathematisch-physikalische Simulationsmodell der gesamten Kraftwerksanlage - des Reaktors, Dampferzeugers, Zwischenwärmetauschers, Turbogenerators und der Rohrleitungen - dargestellt. Anhand dieses Simulationsmodells, das ein sehr komplexes, zum Teil nichtlineares Gleichungssystem enthält und daher für die regelungstechnische Untersuchung ungeeignet ist, wird im Kapitel 4 das dynamische Verhalten für verschiedene Arbeitspunkte untersucht. Für die dabei ermittelten Übergangsfunktionen werden mit Hilfe geeigneter Analyseverfahren entsprechende lineare Übertragungsfunktionen ermittelt, die zur Bildung reduzierter mathematischer Modelle dienen. Im Kapitel 5 werden zwei verschiedene vereinfachte mathematische Modelle erstellt. Das eine Modell beschreibt unter Ausnutzung der vorhandenen Rechnerkapazität das dynamische Verhalten der gesamten Anlage, während das andere zum Zweck des Regler- und Beobachterentwurfs weitere Modellvereinfachungen enthält. Im Kapitel 6 wird das geplante konventionelle Regelungskonzept des Kernkraftwerks erläutert, mit dessen Hilfe das reduzierte mathematische Modell geregelt wird. Zur Beurteilung der Genauigkeit dieses vereinfachten Modells wird es mit dem komplexen mathematisch-physikalischen Modell verglichen. Für das vereinfachte Modell wird im Kapitel 7 ein optimaler Zustandsregler mit Beobachter entworfen. Um gewissen Modellfehlern gegenüber dem realen Prozeß, die infolge der Linearisierung und Modellvereinfachung zwangsläufig entstehen, und den lastabhängigen Parameteränderungen sinnvoll entgegenzuwirken, wird beim Regler- bzw. Beobachterentwurf auf die robuste Eigenschaft des Regelsystems geachtet, die sowohl mit als auch ohne Strukturerweiterung erzielt wird. Das Regelverhal-

ten des optimalen Zustandsreglers wird in der Simulation untersucht und mit dem des konventionellen Reglers verglichen (Kapitel 8).

# 2. Das Kernkraftwerk «SNR 300»

In diesem Abschnitt werden der Aufbau und die physikalischen Zusammenhänge der gesamten Anlage des mit einem natrium-gekühlten schnellen Brutreaktor ausgerüsteten Kernkraftwerks "SNR 300" (Watzel und Rasche (1973)) in Kalkar von der regelungstechnischen Sicht betrachtet.

## 2.1. Komponenten des Kernkraftwerks

Das für eine elektrische Leistung von 300 MW ausgelegte Prototypkernkraftwerk besteht aus den Hauptkomponenten

- Reaktor,
- Zwischenwärmetauscher (ZWT),
- Dampferzeuger (DE) und
- Turbogenerator (Turbo).

Diese sind über Rohrleitungssysteme physikalisch miteinander verbunden (Bild 2.1.1). Der *Reaktor* besteht aus einem Reaktortank und einem kompakten Reaktorkern, der sich in eine zentrale Spaltzone und eine ringförmige Brutzone unterteilen läßt.

Die Natrium-Wärmeübertragungssysteme sind aus sicherheitstechnischen Gründen in Primär- und Sekundärkreislaufsystem unterteilt, so daß bei einer Natrium-Wasser-Reaktion, infolge einer eventuellen Undichtigkeit im Dampferzeuger, keine Radioaktivität nach außen gelangen kann. Außerdem werden die bei der Natrium-Wasser-Reaktion auftretenden Druckstöße vom Primärkreislaufsystem bzw. Reaktorkern ferngehalten.

Der *Zwischenwärmetauscher* dient zur Übertragung der Wärmeenergie von Primär- auf das Sekundärkreislaufsystem. Dabei handelt es sich um einen Geraderohr-Gegenstrom-Wärmetauscher, bei dem das Sekundärnatrium von dem der Mantelraum in entgegengesetzter Richtung durchströmenden Primärnatrium umspült und aufgewärmt wird.

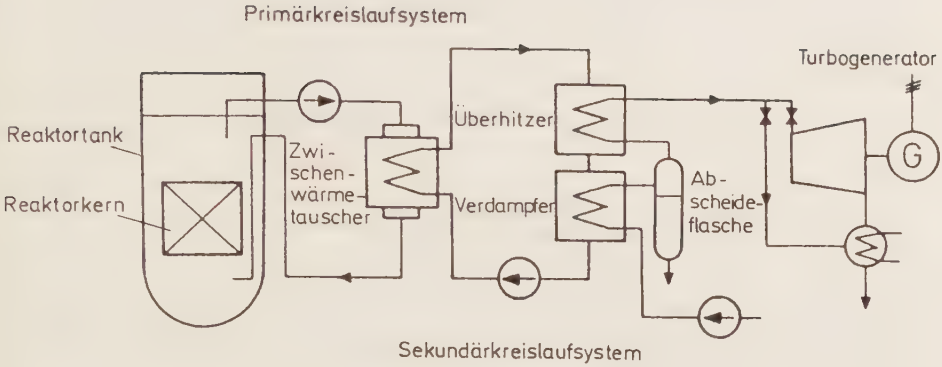



Bild 2.1.1. Schemabild des Kernkraftwerks "SNR 300"

Der *Dampferzeuger* stellt wie der Zwischenwärmetauscher einen Geraderohr-Gegenstrom-Wärmetauscher dar. Er ist in Überhitzer (ÜH) und Verdampfer (VD) unterteilt, um die thermische Belastung des Überhitzers, die durch Änderungen der Energiezu- und -abfuhr (bedingt durch Laständerung) an der Überhitzungszone entsteht, möglichst gering zu halten. Eine zwischen dem Überhitzer und dem Verdampfer angeordnete Abscheideflasche sorgt dafür, daß nur gesättigter Dampf in den Überhitzer zugeführt wird. Da die Temperatur des gesättigten Dampfs nur vom Dampfdruck abhängt, der unabhängig vom Lastniveau im gesamten Arbeitsbereich annähernd konstant gehalten wird, unterliegt die Temperatur am Überhitzereintritt relativ kleinen Schwankungen.

Das im Reaktor um ca. 170 °K aufgewärmte Kühlmittel wird über die Umwälzpumpe zum Zwischenwärmetauscher transportiert, gibt dort seine Wärmeenergie an das Sekundärkreislaufsystem ab und strömt nach einer Transportzeit mit der Reaktoreintrittstemperatur zum Reaktortank zurück. Die an das Sekundärkreislaufsystem übertragene Wärmeenergie wird mit Hilfe der Sekundärpumpe zum Dampferzeuger gefördert, worin aus dem Speisewasser durch das Vorwärmen, Ver-

dampfen und Überhitzen der überhitzte Dampf mit einer Temperatur von 500 °C bei 167 bar Druck erzeugt wird. Der überhitzte Dampf wird anschließend der Turbine zugeführt, in der die thermische Energie des Frischdampfs in die mechanische Energie und schließlich im Generator in die elektrische Energie umgewandelt wird.

## 2.2. Kernkraftwerk als Regelstrecke

Betrachtet man das Kernkraftwerk als Regelstrecke, so ergeben sich für die jeweiligen Komponenten die in Bild 2.2.1 dargestellten Ein- und Ausgangsgrößen.

Zu den Eingangsgrößen, die das dynamische Verhalten des Reaktors beeinflussen, gehören

- die Reaktivität $\rho$,
- die Reaktoreintrittstemperatur $\vartheta_{RE}$ und
- der Kühlmitteldurchsatz $m_{Pr}$.

Als Ausgangsgrößen sind

- die Kernaustrittstemperatur $\vartheta_{KA}$,
- die Reaktoraustrittstemperatur $\vartheta_{RA}$ und
- der Neutronenfluß $\Phi_N$ .

zu betrachten. Während die Reaktoraustrittstemperatur $\vartheta_{RA}$ zusammen mit dem Kühlmitteldurchsatz $m_{Pr}$ ein Maß für die an die nachfolgenden Komponenten zugeführte Wärmeenergie darstellt, dienen die Kernaustrittstemperatur $\vartheta_{KA}$ und der Neutronenfluß $\Phi_N$ zur Regelung bzw. Überwachung des Reaktors.

Für den Zwischenwärmetauscher können

- die primärseitige Eintrittstemperatur $\vartheta_{ZWTPrEin}$,
- der Primärdurchsatz $m_{Pr}$,
- die sekundärseitige Eintrittstemperatur $\vartheta_{ZWTSekEin}$ und
- der Sekundärdurchsatz $m_{Sek}$

als Eingangsgrößen und

- die primärseitige Austrittstemperatur $\vartheta_{ZWTPrAus}$ sowie
- die sekundärseitige Austrittstemperatur $\vartheta_{ZWTSekAus}$

als Ausgangsgrößen betrachtet werden.

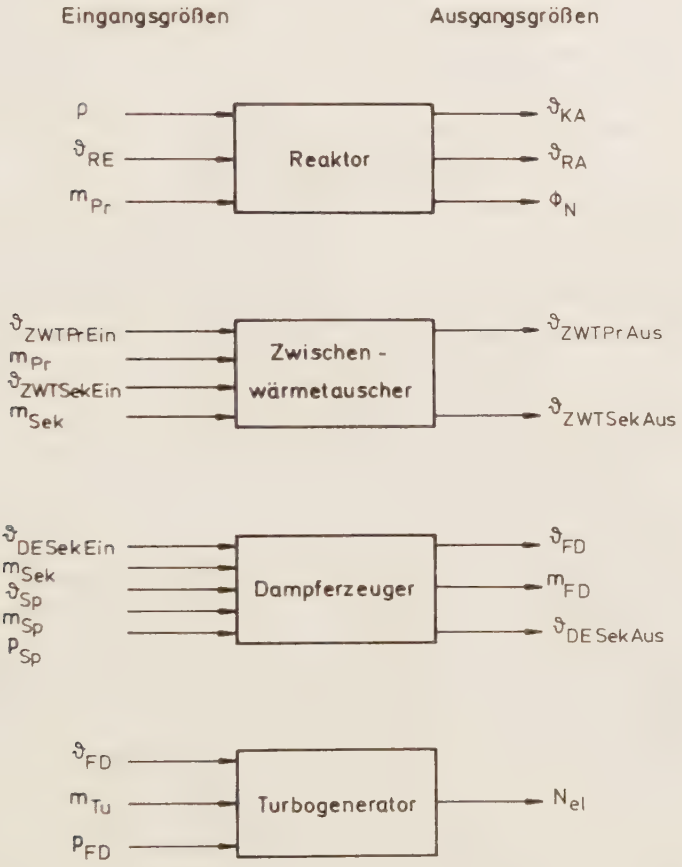



Bild 2.2.1. Ein- und Ausgangsgrößen der Kraftwerkskomponenten

Das dynamische Verhalten der Ausgangsgrößen des Dampferzeugers,

- der Frischdampftemperatur $\vartheta_{FD}$
- des Frischdampfdurchsatzes $m_{FD}$ und
- der sekundärseitigen Austrittstemperatur $\vartheta_{DESekAus}$,

wird sowohl vom Heizmittel durch

- die sekundärseitige Eintrittstemperatur $\vartheta_{DESekEin}$ und
- den Sekundärdurchsatz $m_{Sek}$

als auch vom Speisewasser durch

- die Speisewassertemperatur $\vartheta_{Sp}$ und
- den Speisewasserdurchsatz $m_{Sp}$

beeinflußt. Außerdem kommt der Frischdampfdruck $p_{FD}$ als Eingangsgröße noch hinzu.

Am Ausgang des Turbogenerators entsteht

- die elektrische Leistung $N_{el}$,

beeinflußt von den Eingangsgrößen,

- der Frischdampftemperatur $\vartheta_{FD}$,
- dem Frischdampfdurchsatz $m_{Tu}$ und
- dem Frischdampfdruck $p_{FD}$.

In Bild 2.2.2 ist die gesamte Kraftwerksanlage als eine globale Regelstrecke dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß das Kraftwerk 6 Eingangsgrößen ($\rho$, $m_{Pr}$, $m_{Sek}$, $\vartheta_{Sp}$, $m_{Sp}$, $h_{Tu}$) und 5 Ausgangsgrößen ($\vartheta_{KA}$, $\Phi_N$, $\vartheta_{FD}$, $m_{FD}$, $N_{el}$) besitzt, die für die Regelung und Überwachung der Anlage von Bedeutung sind.

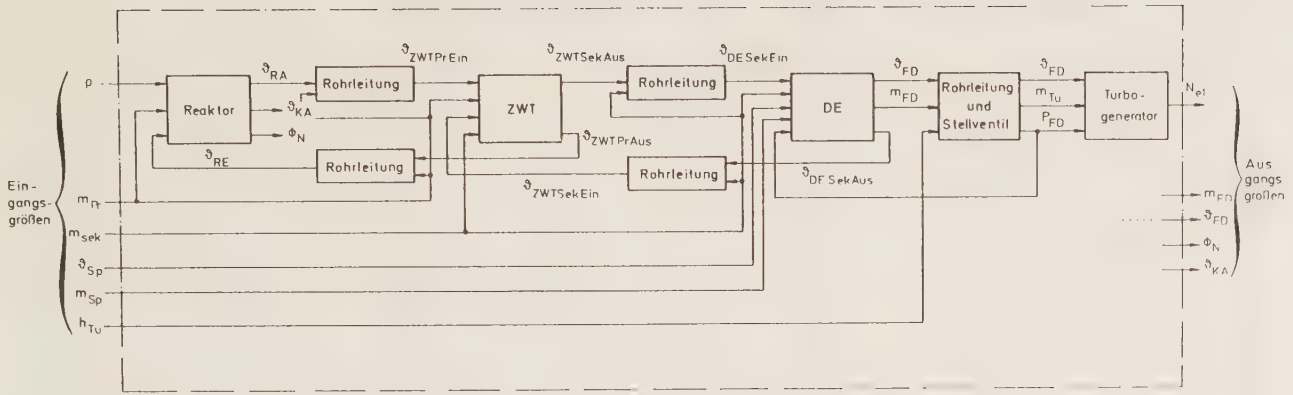



Bild 2.2.2. Blockschaltbild der gesamten Kraftwerksanlage
(ZWT = Zwischenwärmetauscher; DE = Dampferzeuger)

# 3. Das mathematisch-physikalische Simulationsmodell

Zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Kraftwerksanlage im gesamten Arbeitsbereich dient ein mathematisch-physikalisches Modell, das auf den physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruht (Merz (1961), Smidt (1975)).

## 3.1. Reaktor

Das dynamische Verhalten des Reaktors läßt sich durch die Gesetze der Neutronenkinetik, Thermo- und Hydrodynamik darstellen (Ertel (1975), Himmel (1971)). Die Neutronenkinetik beschreibt den Zuwachs der Neutronendichte unter dem Einfluß der Reaktivität. Mittels der Gesetze der Thermo- und Hydrodynamik werden das Temperatur- und Durchsatzverhalten im Reaktor behandelt.

Neutronenkinetik

Die *Reaktorleistung* $N_L$ setzt sich aus der prompten Neutronenleistung $x_{Promp}\Phi_N$ und der Nachzerfallsleistung $N_{Nachz}$ zusammen:

$$N_L(t) = x_{Promp}\Phi_N(t) + N_{Nachz}(t) \; . \tag{3.1.1}$$

Während der Neutronenfluß $\Phi_N$ sich aus den neutronenkinetischen Gleichungen

$$\frac{d\Phi_N(t)}{dt} = \rho(t)\,\frac{\Phi_N(t)}{t_L} - \beta\,\frac{\Phi_N(t)}{t_L} + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i \cdot C_i(t) \tag{3.1.2}$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{t_L}\,\Phi_N(t) - \lambda_i C_i(t), \qquad i = 1,6 \tag{3.1.3}$$

mit dem Anteil der verzögerten Neutronen $\beta$ bzw. der i-ten Gruppe verzögerter Neutronen $\beta_i$, der Zerfallszeitkonstante $\lambda_i$, der Kon-

zentration $C_i$ und der mittleren Lebensdauer der Neutronen $t_L$ als Funktion der Raktivität $\rho$ ermitteln läßt, ergibt sich die Nachzerfallsleistung $N_{Nachz}$ als Funktion der Betriebsdauer des Brennstoffs.

Die *Reaktivität* $\rho$, die die Geschwindigkeit der Neutronenvermehrung darstellt, setzt sich zusammen aus der durch die äußeren Eingriffe, z. B. durch die Absorberstabverstellung verursachten Reaktivitätsänderung $\rho_R$ und der durch Temperaturänderung in den Reaktormaterialien hervorgerufenen Reaktivitätsänderung $\rho_{th}$:

$$\rho(t) = \rho_R(t) + \rho_{th}(t) \quad . \tag{3.1.4}$$

Zu den thermischen Reaktivitätseffekten zählen (Anhang A):

(1) Dopplereffekt,
(2) Kühlmittel- und Stahldichteeffekt,
(3) Reaktivitätseffekt durch axiale Brennstoffausdehnung,
(4) Bowingeffekt.

Thermische Vorgänge im Reaktor

Das Temperaturverhalten des Kerns bzw. der einzelnen Brennelementengruppen läßt sich mit einem oder mehreren repräsentativen Brennstäben darstellen. Ein Brennstab enthält mehrere Axialzonen, die wiederum aus mehreren Brennstoffringzonen, Hüllrohr, Kühlmittel und Struktur (Brennelementen(BE)-Kasten) bestehen (Bild 3.1.1).

Zur Vereinfachung wird vorausgesetzt, daß die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung und Konvektion nur in radiale Richtung erfolgt, also keine Wärmeübertragung zwischen benachbarten Axialzonen stattfindet, und der Wärmetransport mittels Kühlmittel nur in axialer Richtung erfolgt.

Aus der Energiebilanz an einem Volumenelement $V_B$ eines Brennstoffs erhält man die partielle Differentialgleichung

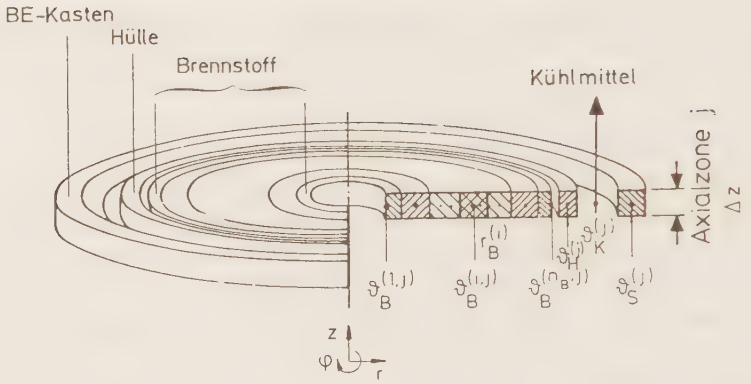



Bild 3.1.1. Axialzone eines repräsentativen Brennstabs

$$c\,\rho^*\frac{\partial\vartheta}{\partial t} = L + \mathrm{div}(\lambda\,\mathrm{grad}\,\vartheta) \qquad (3.1.5)$$

Leistungsdichte, die Temperaturänderung bewirkt

im Volumenelement erzeugte Leistungsdichte

Zuwachs der Leistungsdichte durch Wärmeleitung

$$= L + \lambda\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\vartheta}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\vartheta}{\partial\varphi^2} + \frac{\partial^2\vartheta}{\partial z^2}\right]. \qquad (3.1.6)$$

c ist dabei die spezifische Wärme, $\rho^*$ die Dichte und $\lambda$ die Wärmeleitfähigkeit. Unter der Annahme einer radialen Wärmeübertragung und einer homogenen Temperaturverteilung in der Übertragungsfläche vereinfacht sich Gl.(3.1.6) zu

$$c\,\rho^*\frac{\partial\vartheta}{\partial t} = L + \lambda\,\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\vartheta}{\partial r}\right) \qquad (3.1.7)$$

bzw.

$$\int_{V_B} c\,\rho^*\frac{\partial\vartheta}{\partial t}\,dV = \int_{V_B} L\,dV + \int_{V_B}\lambda\,\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\vartheta}{\partial r}\right)dV\,. \qquad (3.1.8)$$

Führt man für die i-te Brennstoffringzone der j-ten Axialzone folgende Mittelwerte

$$V_B^{(i,j)} = 2\pi\Delta z \int_{r_B^{(i-1)}}^{r_B^{(i)}} r\, dr \,, \tag{3.1.9}$$

$$c_B^{(i,j)} = \frac{2\pi\Delta z}{V_B^{(i,j)}} \int_{r_B^{(r-1)}}^{r_B^{(i)}} c_B(r,z,\vartheta)\, r\, dr \,, \tag{3.1.10}$$

$$\vartheta_B^{(i,j)} = \frac{2\pi\Delta z}{V_B^{(i,j)}} \int_{r_B^{(i-1)}}^{r_B^{(i)}} \vartheta(r,z)\, r\, dr \,, \tag{3.1.11}$$

$$L_B^{(i,j)} = \frac{2\pi\Delta z}{V_B^{(i,j)}} \int_{r_B^{(i-1)}}^{r_B^{(i)}} L(r,z,t)\, r\, dr \tag{3.1.12}$$

ein und linearisiert die Temperaturänderung $\frac{\partial\vartheta}{dr}$ wie folgt

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial r} = \frac{\vartheta_B^{(i+1,j)} - \vartheta_B^{(i,j)}}{\Delta r} \qquad \text{für } r_B^{(i)} \leq r_B \leq r_B^{(i+1)} \tag{3.1.13}$$

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial r} = \frac{\vartheta_B^{(i,j)} - \vartheta_B^{(i-1,j)}}{\Delta r} \qquad \text{für } r_B^{(i-1)} \leq r_B \leq r_B^{(i)} \,, \tag{3.1.14}$$

so läßt sich Gl.(3.1.8) in Form einer gewöhnlichen Differentialgleichung

$$c_B^{(i,j)}\, \rho_B^* \frac{d\vartheta_B^{(i,j)}}{dt} = L_B^{(i,j)} + \frac{2\pi\Delta z}{V_B^{(i,j)}} \lambda \left[ r_B^{(i)} \frac{\vartheta_B^{(i+1,j)} - \vartheta_B^{(i,j)}}{\Delta r} - r_B^{(i-1)} \frac{\vartheta_B^{(i,j)} - \vartheta_B^{(i-1,j)}}{\Delta r} \right] \tag{3.1.15}$$

umschreiben. Für die äußere Brennstoffzone ($r = r_B^{(n_B)}$) erhält man die Randbedingung

$$\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = \alpha_{B/H} \left(\vartheta_B^{(n_B,j)} - \vartheta_H^{(j)}\right) . \qquad (3.1.16)$$

Daraus folgt:

$$c_B^{(n_B,j)} \rho_B^* \frac{d\vartheta_B^{(n_B,j)}}{dt} = \frac{2\pi\Delta z}{V_B^{(n_B,j)}} \left[-r_B^{(n_B-1)} \lambda \frac{\vartheta_B^{(n_B,j)} - \vartheta_B^{(n_B-1,j)}}{\Delta r} - \alpha_{B/H} r_H \left(\vartheta_B^{(n_B,j)} - \vartheta_H^{(j)}\right)\right] + L_B^{(n_B,j)} . \qquad (3.1.17)$$

Für die Hülle gilt:

$$c_H^{(j)} \rho_H^* \frac{d\vartheta_H^{(n_B,j)}}{dt} = \frac{2\pi\Delta z}{V_H^{(j)}} \alpha_{B/H} r_H \left(\vartheta_B^{(n_B,j)} - \vartheta_H^{(j)}\right) - \alpha_{H/K} r_K \left(\vartheta_H^{(j)} - \vartheta_K^{(j)}\right) . \qquad (3.1.18)$$

Das Kühlmittel, das mit einer Geschwindigkeit $w_K^{(j)}$ axial an einem zylindrischen Brennstab entlangströmt, gehorcht der Differentialgleichung

$$c_K^{(j)} \rho_K^{*(j)} \frac{d\vartheta_K^{(j)}}{dt} = \frac{2\pi\Delta z}{V_K^{(j)}} \alpha_{H/K} r_K \left(\vartheta_H^{(j)} - \vartheta_K^{(j)}\right) - \alpha_{K/S} r_S \left(\vartheta_K^{(j)} - \vartheta_S^{(j)}\right) - \rho_K^{*(j)} c_K^{(j)} w_K^{(j)} \frac{\vartheta_K^{(j+1)} - \vartheta_K^{(j-1)}}{2\Delta z} + L_K^{(j)} . \qquad (3.1.19)$$

Für die Struktur gilt:

$$c_S^{(j)} \rho_S^* \frac{d\vartheta_S^{(j)}}{dt} = \frac{2\pi\Delta z}{V_S^{(j)}} \alpha_{K/S} r_S (\vartheta_K^{(j)} - \vartheta_S^{(j)}) . \qquad (3.1.20)$$

In Bild 3.1.2 ist die stationäre Temperaturverteilung des Reaktorkerns im Nennzustand dargestellt, wobei der Brennstoff in 9 Axial- und 4 Radialzonen unterteilt wurde.

Die mittlere Kernaustrittstemperatur $\vartheta_{KA}$ erhält man durch gewichtete Mittelung der BE-Austrittstemperatur $\vartheta_A$:

$$\vartheta_{KA} = \sum_{i=1}^{n_{St}} k(i) \vartheta_A^{(i)} . \qquad (3.1.21)$$

Die Eintrittstemperatur $\vartheta_{OPL}$ des oberen Plenums (Bild 3.1.3) ergibt sich aus der auf den Plenumeintritt hin verzögerten mittleren Kerneintrittstemperatur $\vartheta_{KE}^*$ und der Kernaustrittstemperatur $\vartheta_{KA}$

$$\vartheta_{OPL} = k_{KB} \vartheta_{KE}^* + (1-k_{KB}) \vartheta_{KA} . \qquad (3.1.22)$$

$k_{KB}$ ist der Temperaturanteil des Kernbypasses.

Das obere Reaktorplenum wird als Transport- und Diffusionsstrecke dargestellt. Es gilt hierfür der Ansatz

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial t} = D \frac{\partial^2\vartheta}{\partial z^2} - w \frac{\partial\vartheta}{\partial z} \qquad (3.1.23)$$

mit der Diffusionszeitkonstante D und Strömungsgeschwindigkeit w. Teilt man die Diffusionsstrecke in $n_{OPL}$ Teilabschnitte, so lautet die Gleichung für die Temperatur in den einzelnen Abschnitten:

$$\frac{d\vartheta_i}{dt} = \frac{n_{OPL}^2}{\tau_D} (\vartheta_{i+1} - 2\vartheta_i + \vartheta_{i-1}) - \frac{n_{OPL}}{2\tau_T} (\vartheta_{i+1} - \vartheta_{i-1}), \quad 1 \leq i < n_{OPL}$$

(3.1.24)

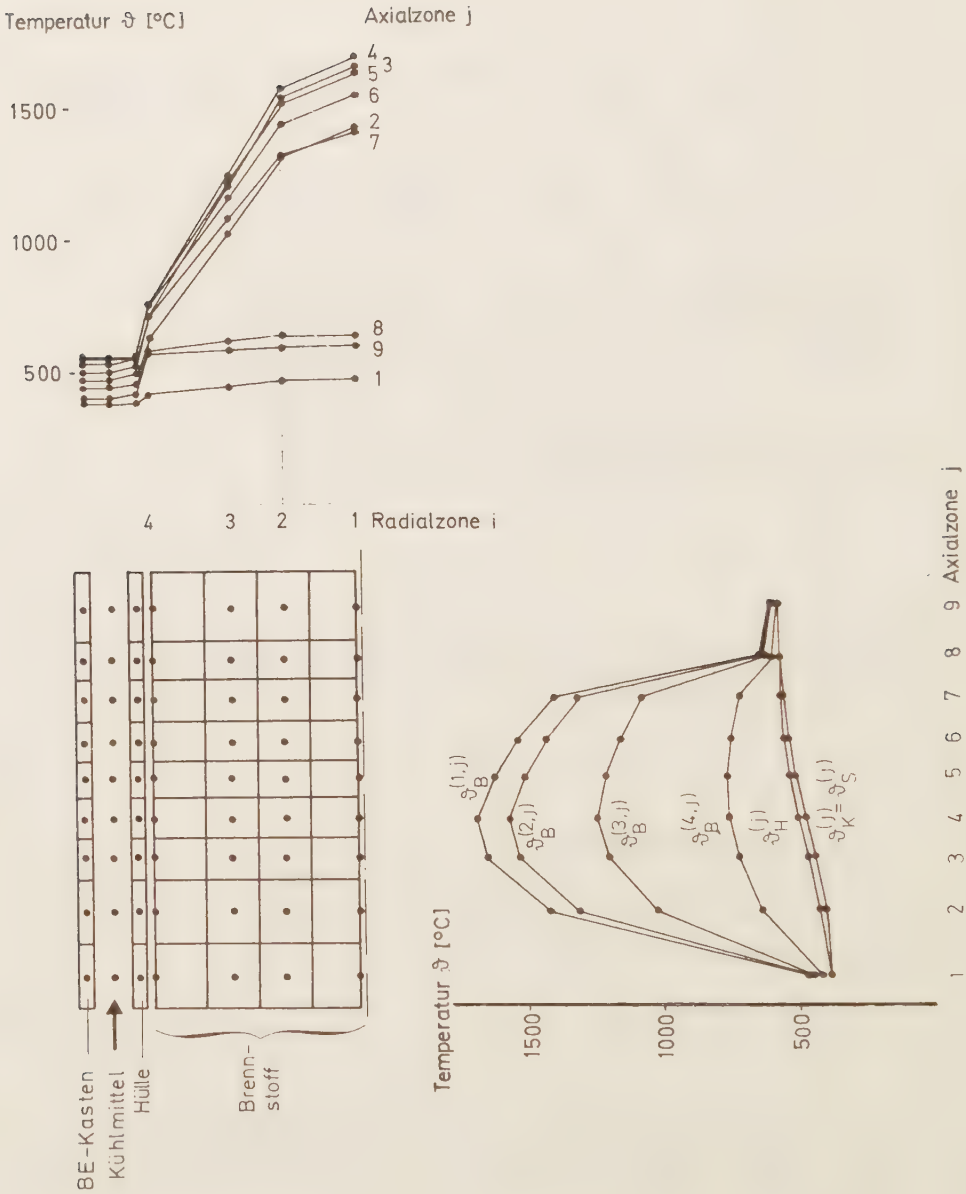



Bild 3.1.2. Stationäre Temperaturverteilung des Reaktorkerns im Nennzustand

wobei $\tau_T$ die Transportzeit und $\tau_D$ die Diffusionszeit darstellt.

Die Reaktoraustrittstemperatur $\vartheta_{RA}$ ergibt sich dann aus dem letzten Abschnitt der Diffusionsstrecke zu:

$$\frac{d\vartheta_{RA}}{dt} = \left(\frac{d\vartheta_i}{dt}\right)_{i=n_{OPL}} = \frac{n_{OPL}^2}{\tau_D}\left(-\vartheta_{n_{OPL}} + \vartheta_{n_{OPL-1}}\right)$$

$$- \frac{n_{OPL}}{\tau_T}\left(\vartheta_{n_{OPL}} - \vartheta_{n_{OPL-1}}\right) . \qquad (3.1.25)$$

Kühlflußdynamik

Aus der Kräftebilanz ergibt sich das Durchsatzverhalten:

- für den Kernkanal

$$\frac{dm_{KK}}{dt} \sum \frac{1}{A_{KK}} = p_e - p_a - p_{RK}\left(\frac{m_{KK}}{m_{KK,O}}\right)^2 + p_{NK} \qquad (3.1.26)$$

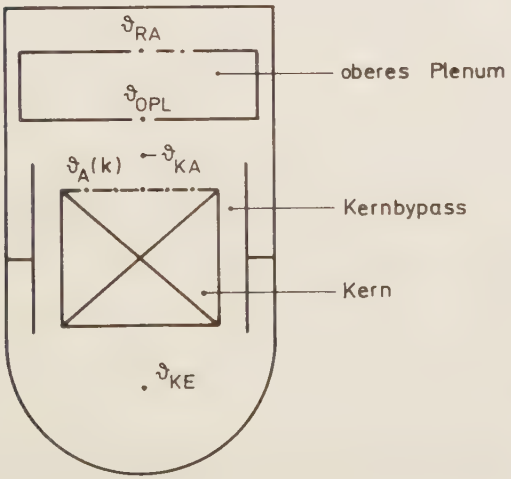



Bild 3.1.3. Temperaturstellen im Reaktor

- für den Primärkreis

$$\frac{dm_{Pr}}{dt} \int \frac{1}{A_{Pr}} = p_e - p_a + p_{PP} - p_{RP}\left(\frac{m_{Pr}}{m_{Pr,O}}\right)^2 + p_{NP} \cdot \qquad (3.1.27)$$

Dabei bedeuten:

| | |
|---|---|
| $m_{KK}$, $m_{Pr}$ | Kühlmitteldurchsatz des Kernkanals bzw. Primärkreises |
| $A_{KK}$, $A_{Pr}$ | Strömungsquerschnitt des Kernkanals bzw. Primärkreises |
| $p_e$ | Druck am Reaktoreintritt |
| $p_a$ | Druck am Reaktoraustritt |
| $p_{PP}$ | Förderdruck der Pumpe |
| $p_{RK}$, $p_{RP}$ | Reibungsdruckverlust im Kernkanal bzw. Primärkreis |
| $p_{NK}$, $p_{NR}$ | Naturumlaufdruck im Kernkanal bzw. Primärkreis |

Der Förderdruck $p_{PP}$ bzw. die Förderhöhe H der Umwälzpumpe ergeben sich aus der Pumpen- und Drosselkennlinie; sie lassen sich näherungsweise durch folgende analytische Gleichungen darstellen:

$$\frac{H}{H_o} = k_1 \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 + k_2 \frac{\omega}{\omega_o} m - k_3 m^2 \qquad (3.1.28)$$

$$\frac{H_R}{H_o} = k_4 m^2 , \qquad (3.1.29)$$

wobei $\omega$ die Winkelgeschwindigkeit der Pumpe und $k_1$, $k_2$, $k_3$ und $k_4$ die konstanten Koeffizienten der Pumpen- bzw. Drosselkennlinie darstellen. Der Schnittpunkt der beiden Kennlinien ist der Arbeitspunkt der Pumpe.

## 3.2. Dampferzeuger

Aufgrund besonderer Anforderungen - bedingt durch hohe Dampftemperatur und hohen Dampfdruck - und der speziellen Beheizung von Zwangs-

durchlaufdampferzeugern wurden bei der Entwicklung des mathematisch-physikalischen Simulationsmodells folgende Gesichtspunkte berücksichtigt:

a) Nichtlinearitäten, die sich einerseits durch Kopplung des Wärmeflusses zwischen der Rohrwand mit variabler Wandtemperatur und dem strömenden Heiz- und Arbeitsmittel und andererseits durch die Druckabhängigkeit der physikalischen Zustandsgrößen ergeben.

b) Wärmespeichervorgänge, die besonders bei der Natriumbeheizung zwischen Rohrwand und Durchflußmedien auftreten.

Die Beschreibung des Dampferzeugermodells, das sich gemäß Bild 3.2.1 in drei Zonen - Vorwärm-, Verdampfer- und Überhitzerzone - mit variabler Zonenlänge unterteilen läßt, basiert auf den Erhaltungssätzen von Masse, Energie und Impuls (Schönfeld (1969), Bruens, Brukx und Latzko (1975), Yamada und Holik (1977), Profos (1962)). Ausgehend von den allgemeingültigen physikalischen Zusammenhängen können jeweils für das Arbeitsmittel, die Rohrwand und das Heizmittel gültige Gleichungen zur Bestimmung der Zustandsgrößen des Dampferzeugers dargestellt werden.

Arbeitsmittel (Wasser/Dampf)

*Massenbilanz:*

Für das Volumenelement V(t) in Bild 3.2.1 gilt die Kontinuitätsgleichung der Masse:

$$\underbrace{\int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t}\, \rho^*(r,z,t)\, dV}_{\text{Anteil der Dichte an Durchsatzänderung}} + \underbrace{\int_{V(t)} \operatorname{div}\left[\rho^*(r,z,t)\, \vec{w}(z,t)\right] dV}_{\text{Anteil der Strömungsgeschwindigkeit an Durchsatzänderung}} = 0 \qquad (3.2.1)$$

Durch Einführung der über den Strömungsquerschnitt A gemittelten Dichte

$$\rho^*(z,t) = \frac{1}{A} \int_A \rho^*(r,z,t)\, dA \qquad (3.2.2)$$

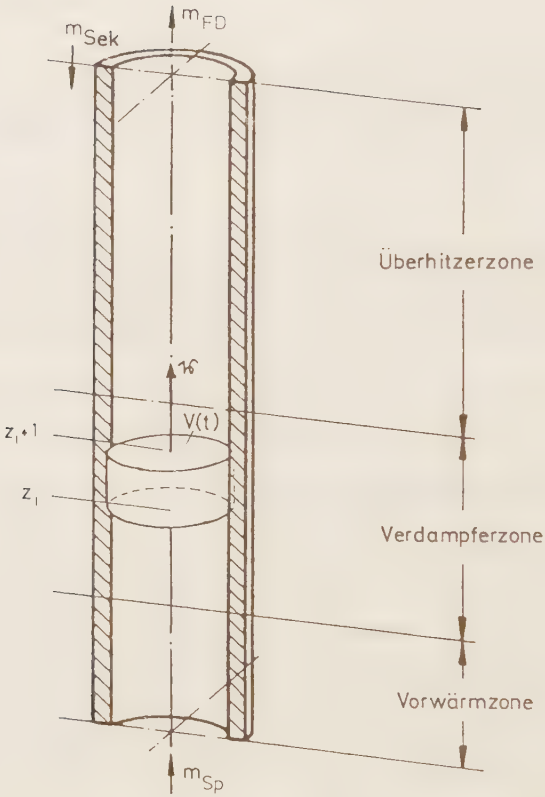



Bild 3.2.1. Schematische Darstellung eines Geraderohr-Gegenstrom-Dampferzeugers

läßt sich das erste Integral der Gl.(3.2.1) umschreiben

$$\int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} \rho^*(r,z,t)dV = A \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial t} \rho^*(z,t)\, dz \ , \qquad (3.2.3)$$

wobei die Integrationsgrenzen $z_i$ und $z_{i+1}$ Funktionen der Zeit sind. Durch Vertauschen der Integral- und Differentialzeichen erfolgt eine weitere Umformung:

$$A \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial t} \rho^*(z,t)dz = A \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \rho^*(z,t)\, dz$$

$$- A\rho^*(z_{i+1},t) \frac{dz_{i+1}}{dt} + A\rho^*(z_i,t) \frac{dz_i}{dt} . \qquad (3.2.4)$$

Für das zweite Integral der Gl.(3.2.1) läßt sich schreiben:

$$\int_{V(t)} \operatorname{div}\left[\rho^*(r,z,t)\vec{w}(z,t)\right] dV =$$

$$= \int_{z_i}^{z_{i+1}} \left[\frac{\partial}{\partial z} \int_A \rho^*(r,z,t)\, w_z(z,t)dA\right] dz . \qquad (3.2.5)$$

Durch Einführung der Definition des Massendurchsatzes pro Flächeneinheit

$$G(z,t) = \frac{1}{A} \int_A \rho^*(r,z,t)\, w_z(z,t)\, dA \qquad (3.2.6)$$

und Zusammenfassen der Gln.(3.2.4) und (3.2.5) ergibt sich die Kontinuitätsgleichung für variable Integrationsgrenzen:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \rho^*(z,t)dz - \rho^*(z_{i+1},t) \frac{dz_{i+1}}{dt} + \rho^*(z_i,t) \frac{dz_i}{dt}$$

$$+ \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial z} G(z,t)dz = 0 . \qquad (3.2.7)$$

Führt man die mittlere Dichte

$$\rho_i^*(t) = \frac{1}{z_{i+1} - z_i} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \rho^*(z,t)dz \qquad (3.2.8)$$

ein, so erhält man aus Gl.(3.2.7)

$$\frac{d}{dt}\left[\rho_i^*(t)\ (z_{i+1} - z_i)\right] - \rho^*(z_{i+1},t)\ \frac{dz_{i+1}}{dt} + \rho^*(z_i,t)\ \frac{dz_i}{dt}$$

$$+ \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial z}\, G(z,t)\, dz = 0 \ . \qquad (3.2.9)$$

Schließlich folgt durch weitere Umformung:

$$(z_{i+1} - z_i)\ \frac{d\rho_i^*(t)}{dt} + \rho_i^*(t)\left[\frac{dz_{i+1}}{dt} - \frac{dz_i}{dt}\right] - \rho^*(z_{i+1},t)\ \frac{dz_{i+1}}{dt}$$

$$+ \rho^*(z_i,t)\ \frac{dz_i}{dt} + G(z_{i+1},t) - G(z_i,t) = 0. \qquad (3.2.10)$$

*Energiebilanz:*

Bei der Aufstellung der Energiebilanzgleichung

$$\underbrace{\int_{V(t)} \phi\, dV}_{\text{einströmende Energie}} = \underbrace{\int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t}\,(e\rho^*)\, dV}_{\text{zeitliche Energieänderung im Volumenelement}} + \underbrace{\int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial z}\, h\rho^*\, w_z\, dz}_{\text{aus dem Volumenelement transportierte Energie}} \qquad (3.2.11)$$

werden folgende Vereinfachungen vorausgesetzt:

a) Die Energiezufuhr erfolgt nur durch die Übertragungsfläche (kein Strahlungsbeitrag).

b) Der Einfluß der Schwerkraft ist vernachlässigbar (Zwangskonvektion).

c) Der Beitrag der kinetischen Energie der Strömung zur gesamten Energiebilanz ist vernachlässigbar.

Mit der inneren Energie, die sich aus der Enthalpie h und der Verschiebearbeit $\frac{p}{\rho^*}$ zusammensetzt,

$$e = h - \frac{p}{\rho^*} , \tag{3.2.12}$$

folgt aus Gl.(3.2.11)

$$\int_{V(t)} \phi \, dV = \int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} h\rho^* dV - \int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} p \, dV + \int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial z} h\rho^* w_z \, dV . \tag{3.2.13}$$

Führt man die durchflußgemittelte Enthalpie

$$h_G(z,t) = \frac{1}{G} \{\frac{1}{A}\int_A h\rho^* w_z \, dA\} , \tag{3.2.14}$$

die volumengemittelte Enthalpie

$$h_V(z,t) = \frac{1}{\rho^*}\{\frac{1}{A}\int_A h\rho^* \, dA\} \tag{3.2.15}$$

und den über den Strömungsquerschnitt gemittelten Druck

$$p_A(z,t) = \frac{1}{A}\int_A p(r,z,t) \, dA \tag{3.2.16}$$

in Gl.(3.2.13) ein, so erhält man

$$A \int_{z_i}^{z_{i+1}} \phi \, dz = A \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial t} h_V \rho^* dz - A \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial t} p_A \, dz + A \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial z} h_G G \, dz . \tag{3.2.17}$$

Durch weitere Umformung der zeitabhängigen Integrale ergibt sich:

$$A \int_{z_i}^{z_{i+1}} \phi \, dz = A \frac{\partial}{\partial t}\left[\int_{z_i}^{z_{i+1}} h_V \rho^* dz\right] - \frac{dz_{i+1}}{dt}\left[A\, h_V(z_{i+1})\, \rho^*(z_{i+1}) - A\, p_A(z_{i+1})\right]$$

$$+ \frac{dz_i}{dt}\left[A\, h_V(z_i)\, \rho^*(z_i) - A\, p_A(z_i)\right]$$

$$- A \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_i}^{z_{i+1}} p_A \, dz + A \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial z} h_G G \, dz \, . \qquad (3.2.18)$$

Mit den Näherungen

$$A \int_{z_i}^{z_{i+1}} \phi \, dz = \frac{\vartheta_R^{(i)}(t) - \vartheta_f^{(i)}(t)}{R_{R/f}^{(i)}} \, , \qquad (3.2.19)$$

$$A \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_i}^{z_{i+1}} h_V \rho^* dz = A \frac{d}{dt}\left[h_V^{(i)} \rho_i^* (z_{i+1} - z_i)\right] \, , \qquad (3.2.20)$$

$$h_V^{(i)} = \frac{\int_{z_i}^{z_{i+1}} h_V \rho^* dz}{\rho_i^* (z_{i+1} - z_i)} \, , \qquad (3.2.21)$$

$$A \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_i}^{z_{i+1}} p_A dz = A \frac{d}{dt}\left[p_A^{(i)} (z_{i+1} - z_i)\right] \, , \qquad (3.2.22)$$

$$p_A^{(i)} = \frac{1}{z_{i+1} - z_i} \int_{z_i}^{z_{i+1}} p_A dz \qquad (3.2.23)$$

und

$$A \int_{z_1}^{z_{1+1}} \frac{\partial}{\partial t} h_G G \, dz = A\, G(z_{i+1})\, h_G(z_{i+1}) - A\, G_i(z_i)\, h_G(z_i)$$

(3.2.24)

folgt schließlich als Energiegleichung für das Arbeitsmittel:

$$\frac{\vartheta_R^{(i)}(t) - \vartheta_f^{(i)}(t)}{R_{R/f}^{(i)}} = A \frac{d}{dt}\left[h_V^{(i)} \rho_i^*(z_{i+1} - z_i)\right] + A\, G(z_{i+1})\, h_G(z_{i+1})$$

$$- A\, G(z_i)\, h_G(z_i) - A \frac{d}{dt}\left[p_A^{(i)}(z_{i+1} - z_i)\right]$$

$$+ \left[A\, p_A(z_{i+1}) - A\rho^*(z_{i+1})\, h_V(z_{i+1})\right] \frac{dz_{i+1}}{dt}$$

$$- \left[A\, p_A(z_i) - A\rho^*(z_i)\, h_V(z_i)\right] \frac{dz_i}{dt} \,. \qquad (3.2.25)$$

*Impulsbilanz:*

Der allgemeingültige Impulssatz für Flüssigkeiten:

$$\frac{d}{dt}\int (\rho^* \mathfrak{w})\, dV = \underbrace{\frac{\partial}{\partial t}\int (\rho^* \mathfrak{w})\, dV}_{\text{Beschleunigungsimpuls}} + \underbrace{\int \rho^* \mathfrak{w}\mathfrak{w}\, dA}_{\substack{\text{durch die Oberfläche} \\ \text{austretender Impuls}}} \qquad (3.2.26)$$

$$= \underbrace{\int \kappa\, dV}_{\substack{\text{durch äußere Kräfte} \\ \text{resultierender Impuls}}} - \underbrace{\int \operatorname{grad} p\, dV}_{\substack{\text{durch Druck} \\ \text{übertragener Impuls}}} + \underbrace{\int \nabla \mathfrak{R}\, dV}_{\substack{\text{durch Reibungskraft} \\ \text{übertragener Impuls}}} \qquad (3.2.27)$$

läßt sich unter den Annahmen, daß

- der Druck p über den Strömungsquerschnitt konstant ist,
- die Reibungskräfte zwischen Flüssigkeiten und zwischen Wasser und Dampf vernachlässigbar sind und
- die Reibungskraft zwischen Rohrwand und Wasser/Dampf proportional dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit ist,

für das Volumenelement in Bild 3.2.1 schreiben:

$$\int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{d}{dt}(A\,G)\,dz + \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial z}(A\,G^2\mu)\,dz$$

$$+ \int_{z_i}^{z_{i+1}} A\,g\,\rho^*\,dz + \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial z}(A\,p)\,dz + \int_{z_i}^{z_{i+1}} \left(\frac{A}{2d}\,\zeta\,\mu\,G^2\right)dz = 0\,. \tag{3.2.28}$$

$\mu$ bedeutet dabei das spezifische Volumen, $\zeta$ den Widerstandsbeiwert und d den Durchmesser des Rohrs. Die Integrale können innerhalb eines Volumenelements durch Mittelwertbildung angenähert werden. Man erhält dann als vereinfachte Impulsgleichung:

$$A\frac{dG_i}{dt}(z_{i+1} - z_i) + A\{(G_{i+1})^2\,\mu_{i+1} - (G_i)^2\,\mu_i\} = A\,g\,p_i^*(z_{i+1} - z_i)$$

$$+ A(p_{i+1} - p_i) + A\,\frac{\zeta}{2d}\,(G_i)^2\,\mu_i(z_{i+1} - z_i) \tag{3.2.29}$$

mit

$$\frac{dG_i}{dt} = \frac{1}{z_{i+1} - z_i} \int_{z_i}^{z_{i+1}} G_i\,dz \tag{3.2.30}$$

Rohrwand

Unter der Annahme, daß

- die Wärmeleitung nur in radiale Richtung erfolgt

  $\left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0,\ \frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi} = 0\right)$ und

- die spezifische Wärme $c_R$, die Dichte $\rho_R^*$ und die thermische Leitfähigkeit $\lambda_R$ des Rohrs im jeweiligen Volumensegment konstant sind,

lautet die Wärmeleitungsgleichung für die zylinderförmige Rohrwand:

$$\int_{V_R(t)} \frac{\partial}{\partial t} \left[\vartheta(r,z,t)\right] \, dV_R = \frac{\lambda_R}{c_R \rho_R^*} \int_{V_R(t)} \text{div grad}\vartheta(r,z,t) \, dV_R \; . \tag{3.2.31}$$

Das linke Integral läßt sich weiter umformen

$$\int_{V_R(t)} \frac{\partial}{\partial t} \left[\vartheta(r,z,t)\right] dV_R = 2\pi \int_{z_i}^{z_{i+1}} \int_{r_i}^{r_a} \frac{\partial}{\partial t} \left[\vartheta(r,z,t)\right] r \, dr \, dz \tag{3.2.32}$$

mit

$$V_R = 2\pi \int_{z_i}^{z_{i+1}} \int_{r_i}^{r_a} r \, dr \, dz \; . \tag{3.2.33}$$

Mit der über dem Querschnitt gemittelten Wandtemperatur

$$\vartheta_R(z,t) = \frac{2\pi \int_{r_i}^{r_a} \vartheta(r,z,t) \, r \, dr}{2\pi \int_{r_i}^{r_a} r \, dr} \tag{3.2.34}$$

erhält man:

$$\begin{aligned} \int_{V_R(t)} \frac{\partial}{\partial t} \vartheta(r,z,t) dV_R &= \pi\{(r_a)^2 - (r_i)^2\} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial}{\partial t} \vartheta_R(z,t) dz \\ &= \pi\{(r_a)^2 - (r_i)^2\} \left[ \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \vartheta_R(z,t) dz \right. \\ &\quad \left. - \vartheta_R(z_{i+1},t) \frac{dz_{i+1}}{dt} + \vartheta_R(z_i,t) \frac{dz_i}{dt} \right] . \end{aligned} \tag{3.2.35}$$

Für die rechte Seite der Gl.(3.2.31) läßt sich schreiben:

$$\frac{\lambda_R}{c_R \rho_R^*} \int_{V_R(t)} \operatorname{div} \operatorname{grad} \vartheta(r,z,t)\, dV_R = \frac{2\pi}{c_R \rho_R^*} \int_{z_i}^{z_{i+1}} (r_a q_a - r_i q_i)\, dz \tag{3.2.36}$$

mit den Näherungen für die Wärmestromdichten

$$q_a = \frac{\vartheta_{Na}(z,t) - \vartheta_R(z,t)}{R_{Na/R}\, 2\pi r_a (z_{i+1} - z_i)} \tag{3.2.37}$$

und

$$q_i = \frac{\vartheta_R(z,t) - \vartheta_f(z,t)}{R_{R/f}\, 2\pi r_i (z_{i+1} - z_i)}\,, \tag{3.2.38}$$

wobei für die Wärmeleitwiderstände angesetzt wird:

$$R_{Na/R}^{(i)} = \frac{1}{\alpha_{Na/R} 2\pi r_a (z_{i+1} - z_i)} + \frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_m}\right)}{2\pi\, \lambda_R (z_{i+1} - z_i)} \tag{3.2.39}$$

$$R_{R/f}^{(i)} = \frac{\ln\left(\frac{r_m}{r_i}\right)}{2\pi\, \lambda_R (z_{i+1} - z_i)} + \frac{1}{2\pi r_i \alpha_{R/S} (z_{i+1} - z_i)} + \frac{1}{2\pi r_i \alpha_{R/f} (z_{i+1} - z_i)} \tag{3.2.40}$$

Aus den Gln.(3.2.35) und (3.2.36) folgt dann als Energiebilanzgleichung:

$$c_R \rho_R^* \pi \{(r_a)^2 - (r_i)^2\} \left[ (z_{i+1} - z_i) \frac{d}{dt} \vartheta_R^{(i)}(t) - \vartheta_R(z_{i+1},t) \frac{dz_{i+1}}{dt} + \vartheta_R(z_i,t) \frac{dz_i}{dt} \right] = \frac{\vartheta_{Na}^{(i)}(t) - \vartheta_R^{(i)}(t)}{R_{Na/R}^{(i)}} - \frac{\vartheta_R^{(i)}(t) - \vartheta_f^{(i)}(t)}{R_{R/f}^{(i)}}\,. \tag{3.2.41}$$

Die Temperaturen $\vartheta_R^{(i)}$, $\vartheta_{Na}^{(i)}$ und $\vartheta_f^{(i)}$ stellen dabei die entsprechenden integralen Mittelwerte dar.

Heizmittel

Die für das Arbeitsmittel (Wasser/Dampf) abgeleiteten Gleichungen für die Massen- und Energiebilanz können für das Heizmittel unter der Annahme weiter vereinfacht werden, daß die Dichte und der Druck des Heizmittels im gesamten Dampferzeuger konstant sind. Diese Annahme ist wegen der geringen Änderung der Heizmitteldichte und des kleinen Druckabfalls gerechtfertigt.

Aus Gl.(3.2.10) folgt die Massenbilanz für das Heizmittel:

$$G_{Na}(z_i,t)-G_{Na}(z_{i+1},t) = \left(\frac{-\rho^*_{Na}(z_{i+1},t)+\rho^{*(i)}_{Na}(t)}{2}\right)\frac{dz_{i+1}}{dt} + \left(\frac{\rho^*_{Na}(z_i,t)-\rho^{*(i)}_{Na}(t)}{2}\right)\frac{dz_i}{dt} \quad (3.2.42)$$

und aus Gl.(3.2.25) die Energiebilanz:

$$\frac{\vartheta^{(i)}_{Na}(t)-\vartheta^{(i)}_{R}(t)}{R^{(i)}_{Na/R}} = -\left(A_{Na}\rho^{*(i)}_{Na}c_{Na}+A_R\rho^*_R c_R\right)\frac{d}{dt}\left[\vartheta^{(i)}_{Na}(t)\,(z_{i+1}-z_i)\right] + A_{Na}c_{Na}G_{Na}(z_{i+1})\vartheta_{Na}(z_{i+1},t) - A_{Na}c_{Na}G_{Na}(z_i)\vartheta_{Na}(z_i,t) + A_{Na}\rho^*_{Na}(z_{i+1})\,c_{Na}\vartheta_{Na}(z_{i+1},t)\frac{dz_{i+1}}{dt} + A_{Na}\rho^*_{Na}(z_i)\,c_{Na}\vartheta_{Na}(z_i,t)\frac{dz_i}{dt} \quad (3.2.43)$$

Für die Ermittlung des dynamischen Verhaltens wurde der Dampferzeuger in 4 Zonen unterteilt (Bild 3.2.2). In jeder Zone sind die Mas-

sen-, Energie- und Impulsgleichungen, also die Gln.(3.2.10), (3.2.25), (3.2.29), (3.2.41), (3.2.42) und (3.2.43) zu lösen. Da die 6 Gleichungen insgesamt folgende 9 Unbekannte

| | |
|---|---|
| Massendurchsatz des Arbeitsmittels | $G_i$, |
| Dichte des Arbeitsmittels | $\rho_i^*$, |
| Zonenlänge | $z_i$, |
| Rohrwandtemperatur | $\vartheta_R$, |
| Arbeitsmitteltemperatur | $\vartheta_f$, |
| Enthalpie des Heizmittels | $h_{Na}$, |
| Druck des Arbeitsmittels | $p_i$, |
| Massendurchsatz des Heizmittels | $G_{Na}$, |
| Heizmitteltemperatur | $\vartheta_{Na}$ |

enthalten, werden folgende 3 Unbekannte eliminiert:

1) Die Dichte $\rho_i^*$ des Arbeitsmittels wird aus dem Druck und Dampfgehalt errechnet.

2) Die Arbeitsmitteltemperatur $\vartheta_f^{(i)}$ wird aus der Enthalpie und dem Druck bestimmt.

3) Die Zonengrenze $z_i$ wird mittels der Enthalpie ermittelt:

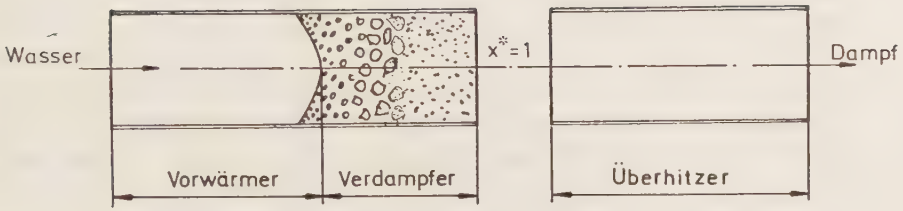
   $h_2 = h(z_2)$ Sättigungsenthalpie

   $h_3 = h(z_3)$ Enthalpie beim Dampfgehalt $x^* = 0,5$

   $h_4 = h(z_4)$ Enthalpie des gesättigten Dampfs $x^* = 1,0$

Die hier dargestellten Massen-, Energie- und Impulsgleichungen können je nach dem Randbedingungen der jeweiligen Zone zum Teil noch vereinfacht werden. Die für die jeweiligen Zonen gültigen Differentialgleichungen sind im Anhang B zusammengestellt.

Für das bessere Verständnis sind in Bild 3.2.2 der Temperaturverlauf des Arbeitsmittels, der Rohrwand und des Heizmittels entlang des Dampferzeugers beim Nennzustand dargestellt.



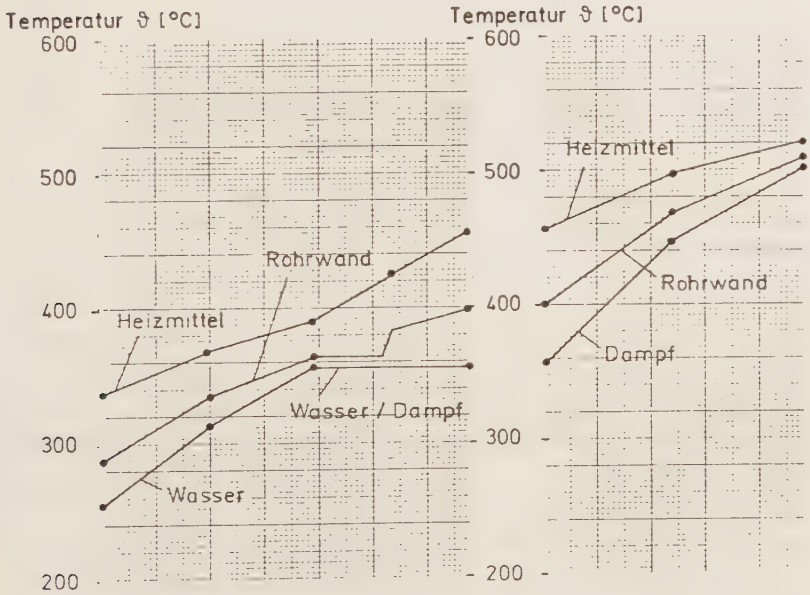




Bild 3.2.2: Stationäre Temperaturverteilung des Dampferzeugers im Nennzustand

## 3.3. Zwischenwärmetauscher

Der nach dem Gegenstromprinzip arbeitende Zwischenwärmetauscher wird, wie beim Dampferzeuger, mit einem repräsentativen Rohr dargestellt (Bild 3.3.1) (Brukx (1974), Gunby (1970), Himmel (1971)). Dabei wird die Wärmeleitung zu den benachbarten Rohren vernachlässigt. Es wird ferner angenommen, daß die Wärmeübertragung in der Rohrwand nur durch axiale Wärmeleitung erfolgt. Zur Beschreibung des Temperaturverhaltens wird der Zwischenwärmetauscher in mehrere Zonen, im Gegensatz zu dem Dampferzeuger, mit fester Zonenlänge unterteilt. Für jede einzelne Zone gilt die für den Dampferzeuger abgeleitete Energiebilanz nach Gl.(3.2.43) und Gl.(3.2.41):

- für das Heizmittel (Primär-Natrium)

$$\frac{\vartheta_{Pr}^{(i)} - \vartheta_{R}^{(i)}}{R_{Pr/R}^{(i)}} = A_{Pr}\,\rho_{Pr}^{*(i)}\,c_{Pr}\,\Delta z_i\,\frac{d}{dt}\,\vartheta_{Pr}^{(i)}(t) + A_{Pr}c_{Pr}\{G_{Pr}^{(i-1)}\vartheta_{Pr}^{(i-1)} - G_{Pr}^{(i+1)}\,\vartheta_{Pr}^{(i+1)}\} \qquad (3.3.1)$$

- für die Rohrwand

$$c_R\rho_R^*\pi\{(r_a)^2 - (r_i)^2\}\,\Delta z_i\,\frac{d}{dt}\,\vartheta_R^{(i)}(t) = \frac{\vartheta_{Pr}^{(i)} - \vartheta_R^{(i)}}{R_{Pr/R}^{(i)}} - \frac{\vartheta_R^{(i)} - \vartheta_{Sek}^{(i)}}{R_{R/Sek}^{(i)}} \qquad (3.3.2)$$

- für das Kühlmittel (Sekundär-Natrium)

$$\frac{\vartheta_{Sek}^{(i)} - \vartheta_S^{(i)}}{R_{R/Sek}^{(i)}} = (A_{Sek}\rho_{Sek}^{*(i)}\,c_{Sek} + A_R\,c_R\,\rho_R^*)\,\Delta z_i\,\frac{d}{dt}\,\vartheta_{Sek}^{(i)} + A_{Sek}c_{Sek}\{G_{Sek}^{(i+1)}\vartheta_{Sek}^{(i+1)} - G_{Sek}^{(i-1)}\vartheta_{Sek}^{(i-1)}\}\,. \qquad (3.3.3)$$

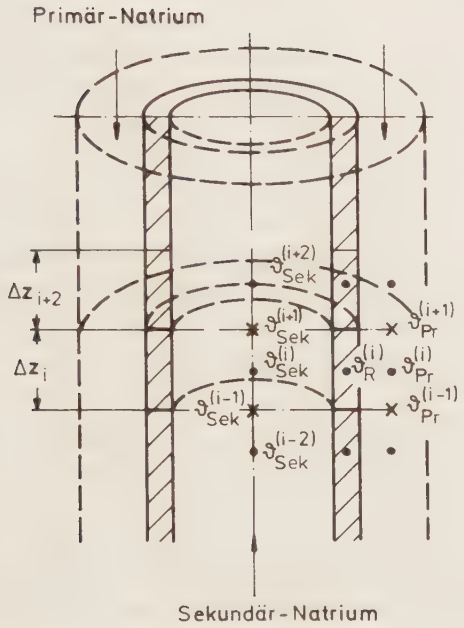



Bild 3.3.1. Schematische Darstellung des Zwischenwärmetauschers

Die Zonengrenztemperatur $\vartheta_{Pr}^{(i+1)}$ und $\vartheta_{Sek}^{(i+1)}$ erhält man durch lineare Interpolation:

$$\vartheta_{Pr}^{(i+1)} = \frac{\Delta z_{i+2}\ \vartheta_{Pr}^{(i)} + \Delta z_i\ \vartheta_{Pr}^{(i+2)}}{\Delta z_i + \Delta z_{i+2}} \qquad (3.3.4)$$

und

$$\vartheta_{Sek}^{(i+1)} = \frac{\Delta z_{i+2}\ \vartheta_{Sek}^{(i)} + \Delta z_i\ \vartheta_{Sek}^{(i+2)}}{\Delta z_i + \Delta z_{i+2}} \ . \qquad (3.3.5)$$

## 3.4. Turbogenerator und Rohrleitungen

Im Gegensatz zu den anderen Komponenten wird der Turbogenerator wegen der relativ kleinen Zeitkonstanten als statisches Modell betrachtet.

Die elektrische Leistung $N_{el}$ errechnet sich aus dem Enthalpiegefälle $h_{E/A}$ zwischen Ein- und Austritt der Turbine, dem Frischdampfdurchsatz $m_{Tu}$ und dem leistungsabhängigen Wirkungsgrad $\eta_{Tu}$ der Turbine:

$$N_{el} = h_{E/A}(\vartheta_{FD}, p_{FD})\ m_{Tu}\ \eta_{Tu}(N_{el}) \quad . \tag{3.4.1}$$

Wie man aus Bild 3.4.1 ersieht, ist das Enthalpiegefälle $h_{E/A}$ sowohl von der Frischdampftemperatur $\vartheta_{FD}$ als auch von dem Frischdampfdruck $p_{FD}$ abhängig. Während die Rohrleitungen im Primär- und Sekundärkreissystem als reine Transportstrecken betrachtet werden, wird die Dynamik der Rohrleitung zwischen dem Dampferzeuger und Turbogenerator wegen ihres Speichervermögens berücksichtigt.

Der Dampfdurchsatz $m_{Tu}$ in der Turbine ist sowohl von der Ventilstellung $h_{Tu}$ als auch vom Dampfdruck $p_{FD}$ in der Rohrleitung abhän-

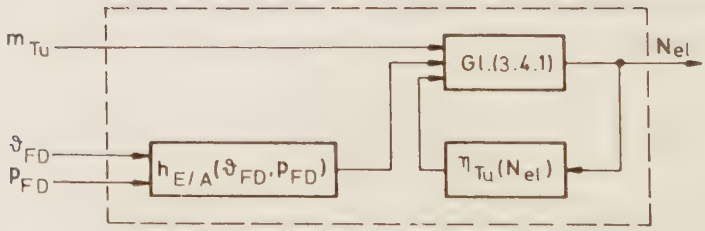



Bild 3.4.1. Blockschaltbild des Turbogenerators

gig und ergibt sich zu:

$$m_{Tu} = k_{Tu}\, p_{FD}\, h_{Tu} \tag{3.4.2}$$

mit dem Umrechnungsfaktor im Nennzustand

$$k_{Tu} = \frac{m_{FD,O}}{p_{FD,O}} \,. \tag{3.4.3}$$

Den Dampfdruck $p_{FD}$ erhält man aus der Gasgleichung

$$p_{FD} = \frac{R}{V}\, M_{FD}\, (\vartheta_{FD} + 273{,}15) \,, \tag{3.4.4}$$

wobei $M_{FD}$ die in der Rohrleitung gespeicherte Frischdampfmenge ist:

$$M_{FD} = \int (m_{FD} - m_{Tu})\, dt \,. \tag{3.4.5}$$

Das Blockschaltbild der Rohrleitung ist im Bild 3.4.2 dargestellt.

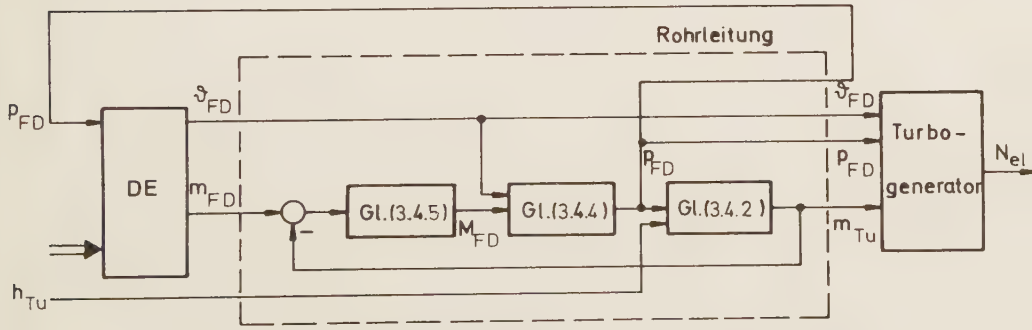



Bild 3.4.2. Blockschaltbild der Rohrleitung zwischen dem Dampferzeuger (DE) und Turbogenerator

Für die Rohrleitungen im Primär- und Sekundärkreislaufsystem sind die Transportzeiten zu berücksichtigen. Sie betragen im Nennzustand

20,6 s vom Reaktor bis Zwischenwärmetauscher
14,2 s vom Zwischenwärmetauscher bis Reaktor
21,5 s vom Zwischenwärmetauscher bis Dampferzeuger
27,4 s vom Dampferzeuger bis Zwischenwärmetauscher

und ändern sich in der Teillast umgekehrt proportional zum Durchsatz.

# 4. Das dynamische Verhalten des Kernkraftwerks

Das im vorherigen Kapitel dargestellte mathematisch-physikalische Modell, das den realen dynamischen Prozeß des Kernkraftwerks aufgrund der physikalischen Gesetze beschreibt, enthält ein komplexes, zum Teil nichtlineares Gleichungssystem und eignet sich nicht für regelungstechnische Untersuchungen. Um ein vereinfachtes lineares mathematisches Modell zu erhalten, werden mit Hilfe des mathematisch-physikalischen Modells Sprungantworten für die wesentlichen Kraftwerkskomponenten ermittelt. Dabei wird der Eingangssprung sowohl in positive als auch in negative Richtung geändert, um eine eventuell vorhandene Richtungsabhängigkeit der Regelstrecke zu erfassen. Die jeweils aus den beiden Sprungantworten gemittelten Übergangsfunktionen h(t) werden anhand geeigneter Approximationsverfahren mit linearen Übertragungsfunktionen niedriger Ordnung approximiert, wodurch neben der Identifikation der Strecke auch eine Reduktion der Modellordnung erzielt wird. Um neben der Richtungsabhängigkeit auch das lastabhängige Verhalten der Strecke zu erfassen, wird die Simulationsuntersuchung an 4 Lastpunkten - 100%, 75%, 50% und 30% der Nennleistung - durchgeführt.

## 4.1. Übergangsfunktionen

### 4.1.1. Reaktor

Die Übergangsfunktionen des Reaktors, dessen Strukturblockschaltbild in Bild 4.1.1 dargestellt ist, wurden mit folgenden Eingangssprüngen ermittelt (Anhang C):

$\rho = \pm 0{,}1$ der Nennreaktivität
$m_{Pr} = \pm 0{,}05$ des Nenndurchsatzes
$\vartheta_{RE} = \pm 20\,^{o}K$ .

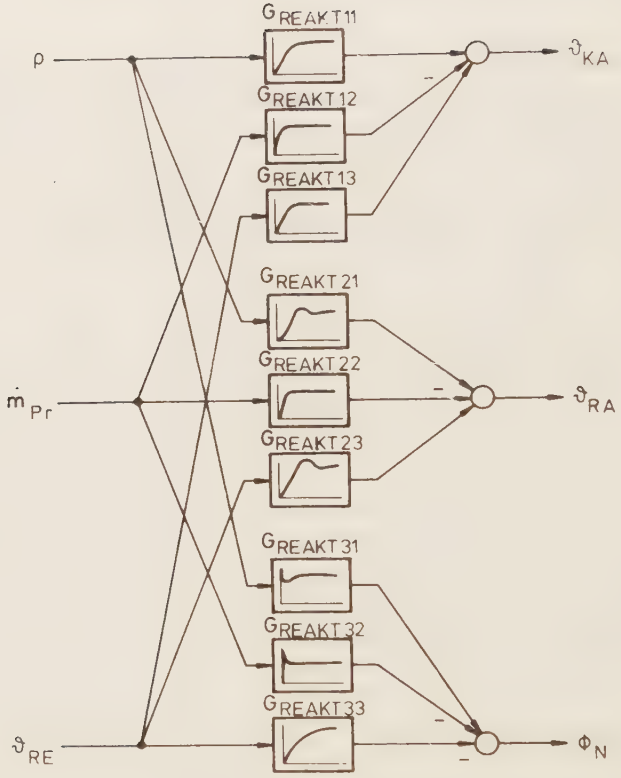



Bild 4.1.1. Strukturblockschaltbild des Reaktors

Die Kernaustrittstemperatur $\vartheta_{KA}$ und Reaktoraustrittstemperatur $\vartheta_{RA}$ weisen bei einer Reaktivitätsänderung ρ und Durchsatzänderung $m_{Pr}$ eine vom Lastzustand unabhängige Temperaturtransiente $d\vartheta/dt$ auf, während sie bei einer Änderung der Reaktoreintrittstemperatur $\vartheta_{RE}$ ein lastabhängiges Verhalten zeigt. Bei einer Temperaturänderung $\vartheta_{RE}$

am Reaktoreintritt sind die Temperaturtransienten $d\vartheta_{KA}/dt$ und $d\vartheta_{RA}/dt$ desto geringer, je kleiner der Kühlmitteldurchsatz $m_{Pr}$ ist. Der Verstärkungsfaktor verhält sich im Gegensatz zur Reaktivitätsänderung $\rho$ und Durchsatzänderung $m_{Pr}$ umgekehrt proportional zur Last.

Der Neutronenfluß $\Phi_N$ ändert sich bei allen 3 Eingangsgrößen nur geringfügig und schwingt sich innerhalb kürzester Zeit auf den stationären Wert ein. Nur bei einer Temperaturänderung $\vartheta_{RE}$ am Reaktoreintritt weist er eine etwas größere Zeitkonstante auf, die sich lastabhängig verhält.

### 4.1.2. Dampferzeuger

Die Übergangsfunktionen des im Strukturblockschaltbild Bild 4.1.2 dargestellten Dampferzeugers wurden mit folgenden Eingangssprüngen ermittelt und in Anhang D zusammengestellt:

$m_{Sek}$ = ± 0,05 des Nenndurchsatzes,
$\vartheta_{DESekEin}$ = ± 20°K,
$m_{Sp}$ = ± 0,05 des Nenndurchsatzes,
$\vartheta_{Sp}$ = ± 20°K,
$p_{FD}$ = ± 5 bar.

Während eine Druckänderung $p_{FD}$ nur kleine thermische Zustandsänderungen am Ausgang des Dampferzeugers verursacht, verursachen Durchsatz- und Temperaturänderungen größere Änderungen der Ausgangsgrößen. Außerdem weisen die Ausgangsgrößen bei Durchsatzänderungen $m_{Sek}$ und $m_{Sp}$ eine größere Lastabhängigkeit und bei einer Temperaturänderung $\vartheta_{DESekEin}$ am Sekundäreintritt eine Last- und Richtungsabhängigkeit auf.

Die bei den meisten Übergangsfunktionen auftretenden, sich periodisch mit kleiner Dämpfung wiederholenden Temperatur- und Durchsatzschwingungen sind auf die interne Rückkopplung des Dampferzeugers zurückzuführen, die sich wie folgt erklären läßt:

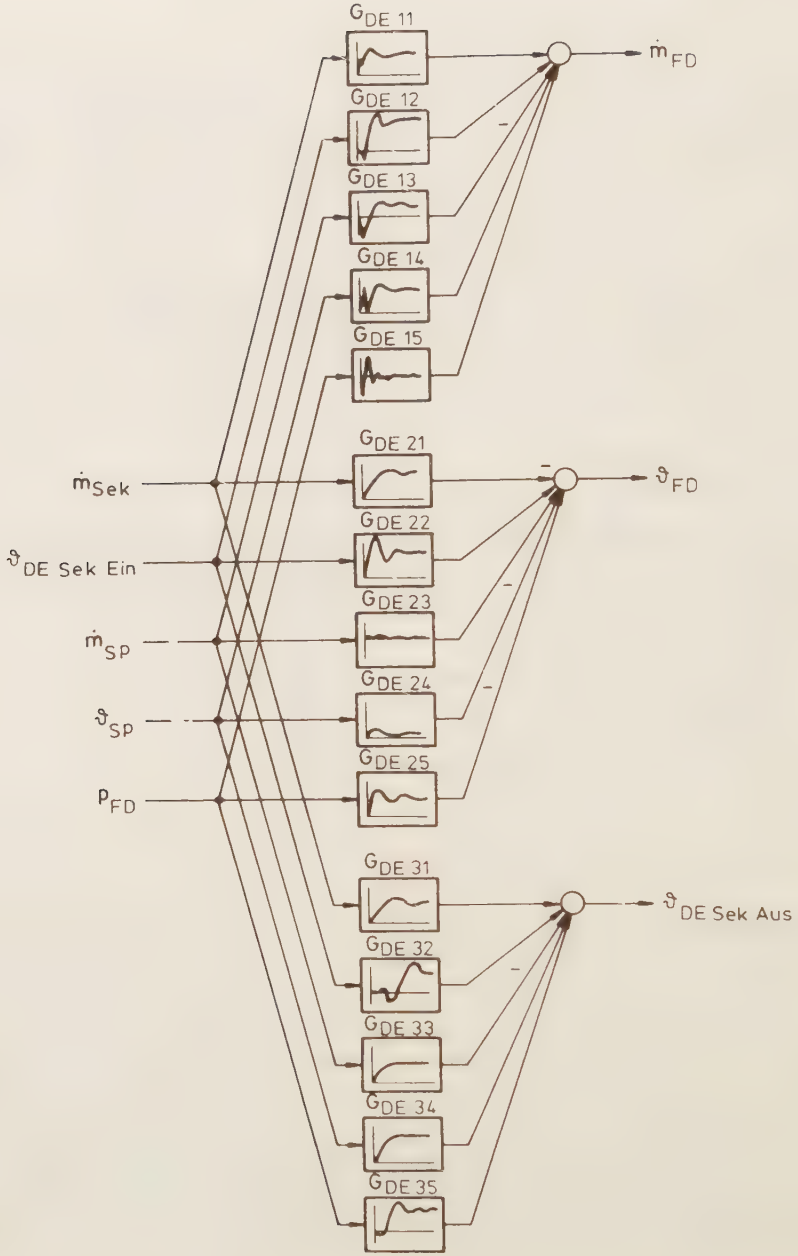



Bild 4.1.2. Strukturblockschaltbild des Dampferzeugers

Eine Erhöhung der Energiezufuhr im Dampferzeuger, z.B. durch Erhöhung der Heizmitteltemperatur $\vartheta_{DESekEin}$, verursacht zunächst den Anstieg der Frischdampftemperatur $\vartheta_{FD}$. Gelangt das Heizmittel mit erhöhter Temperatur in den Verdampfer, so wird darin mehr Naßdampf erzeugt. Je mehr gesättigter Dampf dem Überhitzer zugeführt wird, desto mehr Wärmeenergie des Heizmittels wird für die Erzeugung des überhitzten Dampfs im Überhitzer benötigt. Dadurch sinkt der Energieanteil, der im Verdampfer für die Erzeugung des Naßdampfes zur Verfügung steht. Eine kleinere Dampfmenge führt zur Verringerung der Wärmeabfuhr im Überhitzer, wodurch wiederum mehr Energie im Verdampfer zur Erzeugung des Naßdampfes zur Verfügung steht. Dieser Vorgang wiederholt sich wegen des kleinen Speichervermögens des Dampferzeugers mit geringer Dämpfung. Die Schwingungsdauer entspricht dabei der Transportzeit des Heiz- und Arbeitsmittels im Dampferzeuger.

### 4.1.3. Zwischenwärmetauscher

Das Strukturblockschaltbild des Zwischenwärmetauschers ist aus Bild 4.1.3 zu entnehmen. Die Übergangsfunktionen sind in Anhang E zusammengestellt. Ihre Ermittlung erfolgt unter Verwendung folgender Eingangssprünge:

$m_{Pr}$ = ± 0,05 des Nenndurchsatzes,

$\vartheta_{ZWTPrEin}$ = ± 20 °K ,

$m_{Sek}$ = ± 0,05 des Nenndurchsatzes,

$\vartheta_{ZWTSekEin}$ = ± 20 °K .

Eine primärseitige Erhöhung des Durchsatzes $m_{Pr}$ oder der Eintrittstemperatur $\vartheta_{ZWTPrEin}$ würde nur dann zur Leistungserhöhung des Zwischenwärmetauschers führen, wenn die abgegebene Wärme entsprechend durch Erhöhung des Sekundärdurchsatzes $m_{Sek}$ oder der Aufwärmspanne, d.i. die Temperaturdifferenz zwischen dem Ein- und Austritt des

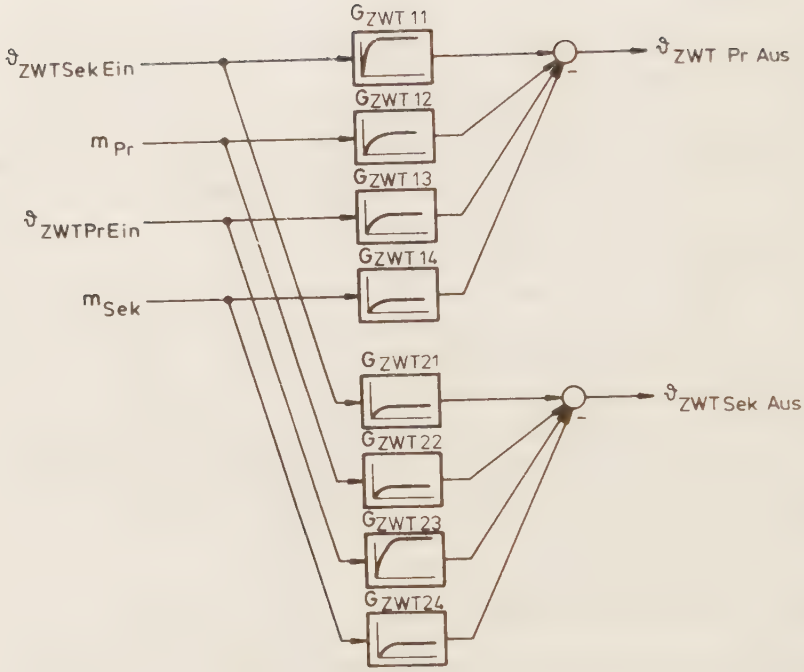



Bild 4.1.3. Strukturblockschaltbild des Zwischenwärmetauschers

Zwischenwärmetauschers im Sekundärkreis, an den Sekundärkreis abgeführt wird. Bei einer Durchsatzänderung $m_{Pr}$ ändert sich die Aufwärmspanne beim gleichbleibenden Sekundärdurchsatz $m_{Sek}$ nur geringfügig, dies führt zwangsläufig zur Erhöhung der primärseitigen Austrittstemperatur $\vartheta_{ZWTPrAus}$. Ähnlich verhalten sich die Temperaturen $\vartheta_{ZWTPrAus}$ und $\vartheta_{ZWTSekAus}$ bei einer Sekundärdurchsatzänderung $m_{Sek}$. Eine Erhöhung des Sekundärdurchsatzes $m_{Sek}$ verursacht eine Erniedrigung der Sekundärseitigen Austrittstemperatur $\vartheta_{ZWTSekAus}$, da die zusätzliche Wärmeabgabe vom Primärkreis ausbleibt, die für das Aufwärmen des erhöhten Durchsatzes $m_{Sek}$ um die gleiche Temperaturspanne erforderlich wäre.

Die Änderung der primärseitigen Eintrittstemperatur $\vartheta_{ZWTPrEin}$ beeinflußt maßgebend die sekundärseitige Austrittstemperatur $\vartheta_{ZWTSekAus}$, während die sekundärseitige Eintrittstemperatur $\vartheta_{ZWTSekEin}$ maßgebend an der Änderung der primärseitigen Austrittstemperatur $\vartheta_{ZWTPrAus}$ beteiligt ist.

4.1.4. Rohrleitung zwischen Dampferzeuger und Turbogenerator

Das Strukturblockschaltbild der Rohrleitung zwischen dem Dampferzeuger und Turbogenerator ist in Bild 4.1.4 dargestellt. Die Über-

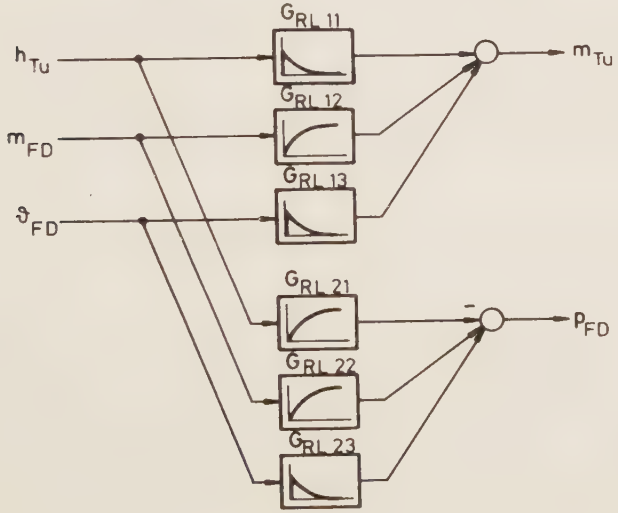



Bild 4.1.4. Strukturblockschaltbild der Rohrleitung zwischen Dampferzeuger und Turbogenerator

gangsfunktionen, die in Anhang F zusammengestellt sind, wurden für folgende Eingangssprünge ermittelt:

$h_{Tu} = \pm 0{,}1$ des Nennhubs,

$m_{FD} = \pm 0{,}1$ des Nenndurchsatzes,

$\vartheta_{FD} = \pm 20\ ^{\circ}K$.

Eine Änderung der Ventilstellung $h_{Tu}$ der Turbine führt zu einer Änderung des Drucks $p_{FD}$ und des Durchsatzes $m_{Tu}$ des Frischdampfs in der Turbine. Eine Vergrößerung der Ventilstellung $h_{Tu}$ bewirkt zuerst eine Zunahme des Dampfdurchsatzes $m_{Tu}$ in der Turbine, die zur Erhöhung der elektrischen Leistung $N_{el}$ führt. Bleibt die Zufuhr der Frischdampfmenge $m_{FD}$ vom Dampferzeuger unverändert, so verringert sich die im Überhitzer und in der Rohrleitung gespeicherte Frischdampfmenge $M_{FD}$. Die Folge ist bei konstanter Frischdampftemperatur $\vartheta_{FD}$ eine Reduzierung des Frischdampfdrucks $p_{FD}$ solange, bis die Dampfdurchsätze $m_{FD}$ und $m_{Tu}$ ins Gleichgewicht kommen.

## 4.2. Approximation der Übergangsfunktionen

Die im vorhergehenden Abschnitt ermittelten Übergangsfunktionen dienen dazu, die Teilregelstrecken des Kernkraftwerks zu identifizieren und gleichzeitig die Systemordnung soweit wie möglich zu reduzieren, ohne daß dabei die Modellgenauigkeit wesentlich verringert wird. Bei diesem Vorgehen werden die anhand des mathematisch-physikalischen Modells numerisch ermittelten Übergangsfunktionen durch lineare mathematische Modelle approximiert, die sich ihrerseits durch Übertragungsfunktionen

$$G(s) = \frac{b_o + b_1 s + \ldots + b_m s^m}{a_o + a_1 s + \ldots + a_n s^n}\ ,\ m<n \qquad (4.2.1)$$

bzw.

$$G(s) = K \frac{(s-N_1) \ \ldots \ (s-N_m)}{(s-P_1) \ \ldots \ (s-P_n)} , \qquad m<n \qquad (4.2.2)$$

niedriger Ordnung beschreiben lassen.

Für die Auswertung der Übergangsfunktionen stand ein komfortables, interaktives Programmsystem (Schmid und Unbehauen (1979)) zur Verfügung, das unter anderem folgende Approximationsverfahren enthält:

- Prony-Verfahren (Kremer und Lacroix (1972), Lacroix (1973)),
- Momentenverfahren (Bolch (1973)),
- PT-Verfahren (Strejc (1959), Sten (1970), Hudzovic (1969), Moncman (1972)).

Die berechneten Übergangsfunktionen des Reaktors und des Zwischenwärmetauschers (siehe Anhang C und E) können mit rationalen Übertragungsfunktionen 2. bis 4. Ordnung sehr genau approximiert werden. Die Approximation mit Übertragungsfunktionen niedrigerer Ordnung liefert zwar gute Übereinstimmung im unteren und oberen Zeitbereich, im mittleren Zeitbereich tritt jedoch eine gewisse Ungenauigkeit auf. Die Approximationsergebnisse des Reaktors und des Zwischenwärmetauschers sind in Anhang G und Anhang I dargestellt.

Im Gegensatz zum Reaktor und Zwischenwärmetauscher stellt sich der Dampferzeuger - wie aus dem Strukturblockschaltbild und Verlauf der Übergangsfunktionen ersichtlich ist - als ein komplexeres System dar. Dementsprechend werden für die Approximation der Übergangsfunktionen Übertragungsfunktionen höherer Ordnung erforderlich. Eine genaue Approximation im gesamten Zeitbereich, wie sie sehr zufriedenstellend für den Reaktor und den Zwischenwärmetauscher erzielt wurde, läßt sich trotz hoher Approximationsordnung nicht bewerkstelligen. Entweder wird die Appriximation im unteren Zeitbereich genau durchgeführt, so daß im oberen Zeitbereich größere Fehler in Kauf genommen werden müssen oder umgekehrt. Eine stärkere Bewertung des unteren Zeitbereichs bis etwa 10 s erwies sich als nicht sinnvoll, da beim Vergleich der Simulationsergebnisse im geschlossenen Regelsystem mit den konventionellen Reglern größere Differenzen gegenüber dem mathematisch-physikalischen Modell auftraten. Um die Systemordnung

des Dampferzeugermodells in Grenzen zu halten, wurden die Übergangsfunktionen mit mathematischen Modellen 2. bis 4. Ordnung approximiert (Anhang H).
Die Pole und Verstärkungsfaktoren der Übertragungsfunktionen entsprechend der Struktur von Gl.(4.2.2) sind für den Reaktor, den Dampferzeuger und den Zwischenwärmetauscher in Anhang J für die 4 Lastzustände - 100%, 75%, 50% und 30% der Nennlast - dargestellt.

Auf die Approximation der Rohrleitungsdynamik zwischen dem Dampferzeuger und dem Turbogenerator wurde verzichtet, da sie keinen direkten Einfluß auf die Reaktor- und Dampferzeuger-Regelung ausübt. Sie wurde jedoch bei der Erprobung des gesamten Regelsystems mit den im Kapitel 3.4 dargestellten Gleichungen, Gl.(3.4.2) bis Gl.(3.4.5), berücksichtigt.

# 5. Das lineare mathematische Modell

Anhand der Approximationsergebnisse der Übergangsfunktionen werden 2 mathematische Modelle erstellt:

- Das erste Modell, das hier als "Modell I" bezeichnet wird, nutzt die vorhandene Rechnerkapazität von zwei Analogrechnern RA 800 vollständig aus, um das dynamische Verhalten der gesamten Kraftwerksanlage mit großer Genauigkeit zu simulieren.

- Beim zweiten Modell, "Modell II", das für den später beschriebenen Regler- und Beobachterentwurf bestimmt ist, wurden weitere Modellvereinfachungen, insbesondere beim Dampferzeuger, vorgenommen. Es enthält nur solche Teilregelstrecken, die für den Regler- bzw. Beobachterentwurf notwendig sind.

Bei der Modellbildung wird nicht nur auf die Modellgenauigkeit, sondern auch auf die gleiche Modellstruktur geachtet, so daß sich für jeweilige Teilstrecken gleiche Systemordnung in allen vier Lastpunkten ergibt.

## 5.1. "Modell I"

Die Systemordnung des mathematischen Modells kann durch Zusammenfassen der gemeinsamen, bzw. nahe zusammengelegenen Pole der Teilregelstrecken verringert werden (Minimalrealisierung). Dabei wird die durch die Polverschiebung verursachte, geringfügige Approximationsungenauigkeit in Kauf genommen. Für die Bewertung der einzelnen Pole wird ein Bewertungsfaktor wie folgt definiert:

$$c_j = \frac{1}{c_E^{(j)}} \left[ c_A^{(j)} + c_F^{(j)} \right], \quad j = 1, \ldots, n_P , \tag{5.1.1}$$

wobei bedeutet:

$c_E^{(j)}$ Bewertungsfaktor der Eingangsgröße,

$c_A^{(j)}$ Bewertungsfaktor der Ausgangsgröße,

$c_F^{(j)}$ Bewertungsfaktor des Approximationsfehlers,

$n_p$ Anzahl der zusammenzufassenden Pole.

Die Bewertungsfaktoren $c_E^{(j)}$, $c_A^{(j)}$ und $c_F^{(j)}$ sind jeweils auf den Wert bezogen, der sich bei einer bestimmten Leistungsänderung, z. B. 10 % der Nennleistung, ergibt (Anhang K).

Der i-te gemeinsame Pol $p_i$ ergibt sich dann

- für den Realteil zu

$$\mathrm{Re}(p_i) = \frac{\sum_{j=1}^{n_p} [c_j \ \mathrm{Re}(s_j)]}{\sum_{j=1}^{n_p} c_j} \qquad (5.1.2)$$

- und für den Imaginärteil zu

$$|\mathrm{Im}(p_i)| = \frac{\sum_{j=1}^{n_p} [c_j |\mathrm{Im}(p_j)|]}{\sum_{j=1}^{n_p} c_j} \qquad (5.1.3)$$

Die Systemordnung des damit erhaltenen mathematischen Modells betragen:

- Reaktor 13
- Dampferzeuger 30
- Zwischenwärmetauscher 13

Die Analogrechenschaltbilder und die zugehörigen Potentiometer-Einstellwerte sind in Anhang L für den Reaktor, in Anhang M für den Dampferzeuger und in Anhang N für den Zwischenwärmetauscher zusammengestellt.

## 5.2. "Modell II"

Um den Zustandsregler und Beobachter übersichtlich und zweckmäßig zu entwerfen, wird am "Modell I" eine weitere Modellreduktion vorgenommen. Das "Modell I", dessen Struktur in Bild 4.1.1 für den Raktor, in Bild 4.1.2 für den Dampferzeuger und in Bild 4.1.3 für den Zwischenwärmetauscher dargestellt ist, enthält alle Übertragungsteilstrecken, die zur Simulation der gesamten Anlage von Wichtigkeit sind. Für den Regler- bzw. Beobachterentwurf der Leistungsregelung können jedoch solche Teilstrecken vernachlässigt werden, deren Ausgangsgrößen keinen wesentlichen Einfluß auf den Regelvorgang ausüben. Zu solchen Ausgangsgrößen gehören die Reaktoraustrittstemperatur $\vartheta_{RA}$, der Neutronenfluß $\Phi_N$ und die sukundärseitige Dampferzeuger-Austrittstemperatur $\vartheta_{DESekAus}$. Ein weiterer Schritt zur Modellvereinfachung ergibt sich durch zusammenfassen einer noch größeren Anzahl von Polen, als es für "Modell I" der Fall war. Die so erzielten Modellordnung sind:

- Reaktor 5 bzw. 6 mit Stellglied
- Dampferzeuger 12 .

Der Zwischenwärmetauscher kann zur Vereinfachung als ein entkoppeltes System betrachtet werden (Bild 5.2.1), da die Temperatur- und Durchsatzänderung keine wesentliche Temperaturänderung in demselben Kreislaufsystem bewirken.

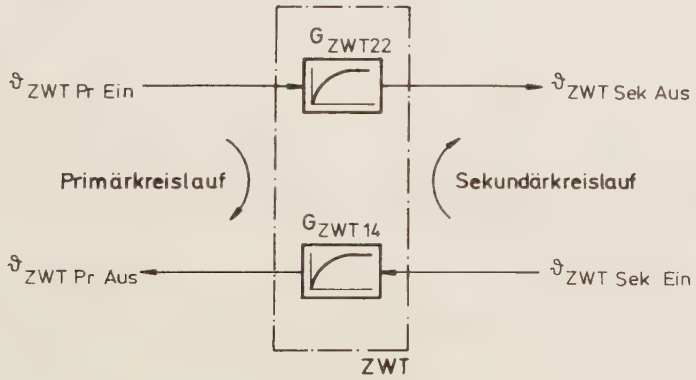



Bild 5.2.1. Strukturblockschaltbild des vereinfachten Zwischenwärmetauschers

Dieses "Modell II" wurde dann zwecks der weiteren Verwendung für den Entwurf des Zustandsreglers und Beobachters in die Zustandsraumdarstellung

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A}_K \, \underline{x}(t) + \underline{B}_K \, \underline{u}(t) \qquad (5.2.1)$$

$$\underline{y}(t) = \underline{C}_K \, \underline{x}(t) \qquad (5.2.2)$$

gebracht (Anhang Q).

# 6. Die konventionelle Leistungsregelung des Kernkraftwerks

Die Leistungsregelung hat die Aufgabe, die gewünschte elektrische Leistung so schnell wie möglich an das Netz einzuspeisen und Störeinflüsse zu kompensieren, ohne daß dabei unerwünschte Zustände im System auftreten.

In diesem Abschnitt wird das Konzept der geplanten konventionellen Leistungsregelung (Heemskerk (1980)) des Kernkraftwerks erläutert. Das mit Hilfe des physikalisch-mathematischen Simulationsmodells ermittelte Regelverhalten dient als Vergleichsmaßstab einerseits zur Beurteilung der Modellgenauigkeit der vereinfachten mathematischen Modelle und andererseits zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines optimalen Zustandsreglers.

## 6.1. Aufbau der konventionellen Leistungsregelung

Um die schnelle Dynamik des Turbogenerators an die langsamen Komponenten des Wärmeübertragungssystems anzupassen, wird die Leistungsregelung in elektrische und thermische Regelung unterteilt (Bild 6.1.1).

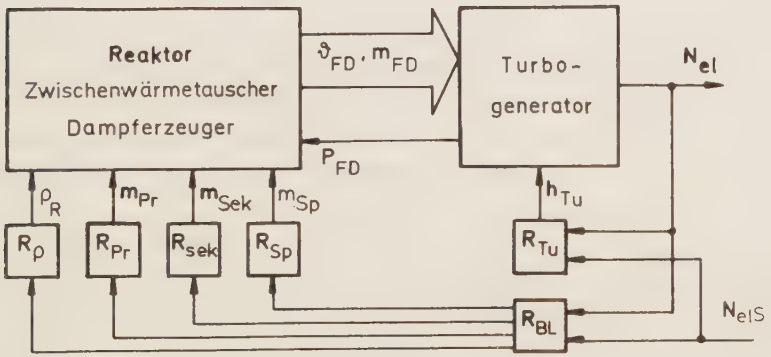



Bild 6.1.1. Blockschaltbild der konventionellen Leistungsregelung

Als Regelgröße der elektrischen Regelung dient die Klemmenleistung $N_{el}$ des Generators und als Stellgröße die Ventilstellung $h_{Tu}$ der Turbine. Die elektrische Leistung wird außer vom Dampfdurchsatz $m_{Tu}$ auch vom thermischen Zustand des Dampfs - Temperatur $\vartheta_{FD}$ und Druck $p_{FD}$ - beeinflußt, die dabei als Störgrößen betrachtet werden müssen.

Bei der thermischen Regelung werden die Frischdampftemperatur $\vartheta_{FD}$ und der Frischdampfdurchsatz $m_{FD}$ durch die Stellgrößen - Reaktivität $\rho_R$, Primär- $m_{Pr}$, Sekundär- $m_{Sek}$ und Speisewasserdurchsatz $m_{Sp}$ - beeinflußt. Als Störgrößen wirken von der Turbinenseite der Frischdampfdruck $p_{FD}$ und innerhalb des Wärmeübertragungssystems die Reaktor- $\vartheta_{RE}$ und Dampferzeuger-Eintrittstemperatur $\vartheta_{DESekEin}$.
Das gesamte Konzept der konventionellen Leistungsregelung und die Reglerparameter sind im Blockschaltbild, Bild 6.1.2, bzw. in Tabelle 6.1.1 dargestellt.

Regelung der elektrische Leistung

Die Regelabweichung der elektrischen Leistung wird gebildet aus der Generatorleistung und dem Sollwert, der beim Unterschreiten des unteren Grenzdrucks durch den Grenzdruckregler (TU3 und TU4) korrigiert wird. Der Leistungsregler TU5, ein PI-Regler, verändert in Abhängigkeit von der Regelabweichung die Ventilstellung bzw. den Frischdampfdurchsatz $m_{Tu}$. Die Korrektur des Leistungssollwertes durch den Grenzdruckregler dient zur Ausnutzung des Speichervermögens und der Dynamik des Dampferzeugers. Der Grenzdruckregler (TU1 und TU2) wird beim Überschreiten des oberen Grenzdrucks das Ventil der Umleitstation so lange betätigen, bis der Druck unter den oberen Grenzdruck sinkt.

Regelung der thermischen Leistung

*Blockleitebene*

Der Blockleitregler B1 dient zur Vorgabe des thermischen Leistungssollwertes an die Komponenten des Wärmeübertragungssystems. Der Leistungssollwert der Blockleitebene wird gebildet aus dem elektrischen

Leistungssollwert $N_{elS}$ und der Ausgangsgröße des Reglers B1. Die Aufschaltung des Sollwertes am Reglerausgang hat den Vorteil, daß der Blockleitregler B1 für einen kleinen Arbeitsbereich ausgelegt werden kann. Die Leistungsvorgabe der Blockleitebene erfolgt nur durch die elektrische Leistung, während bei der elektrischen Leistungsregelung des Generators neben der elektrischen Leistung auch der Druck zur Sollwertvorgabe herangezogen wird. Der Leistungsbegrenzer B2 sorgt dafür, daß die Leistungsvorgabe innerhalb des Arbeitsbereichs, zwischen 100% und 30% der Nennleistung, bleibt. Der maximale Leistungssprung und die zeitliche Leistungsänderung werden durch den Regler B3 und B4 auf 10% bzw. 10%/min begrenzt. Der Leistungssollwert wird anschließend in die thermische Leistung umgesetzt. Die Funktion $f_{BL}$ beinhaltet dabei die Beziehung zwischen thermischer und elektrischer Leistung in Abhängigkeit vom Lastzustand.

*Reaktorregelung*

Es handelt sich bei der Reaktorregelung um eine Temperaturregelung. Der von der Blockleitebene vorgegebene Leistungssollwert wird im Block $f_R$ in einen Temperatursollwert umgewandelt. Die Regelabweichung der Temperatur bewirkt durch den quasistetig arbeitenden PI-Regler, (Dreipunktschalter mit nachgebender Rückführung und Stellmotor mit integralem Verhalten) eine Stellungsänderung der Regelstäbe, wodurch die Reaktivitätsänderung hervorgerufen wird. Der Neutronenfluß $\Phi_N$ wird, um das Sicherheitssystem und das Regelsystem voneinander zu trennen, nicht zur Reaktorregelung herangezogen.

*Durchsatzregelung des Primärkreises*

Es handelt sich hierbei um eine Kaskadenregelung, bei der die Drehzahlregelung der Umwälzpumpe dem Durchsatzregelkreis unterlagert ist. Die Sollwertvorgabe erfolgt ohne Umrechnung des Leistungssollwertes, da der Durchsatz des Primärkreises dem Leistungsniveau entspricht. Zur Anpassung der Durchsatzregelung an die Raktordynamik dienen die Blöcke B5 und B5A.

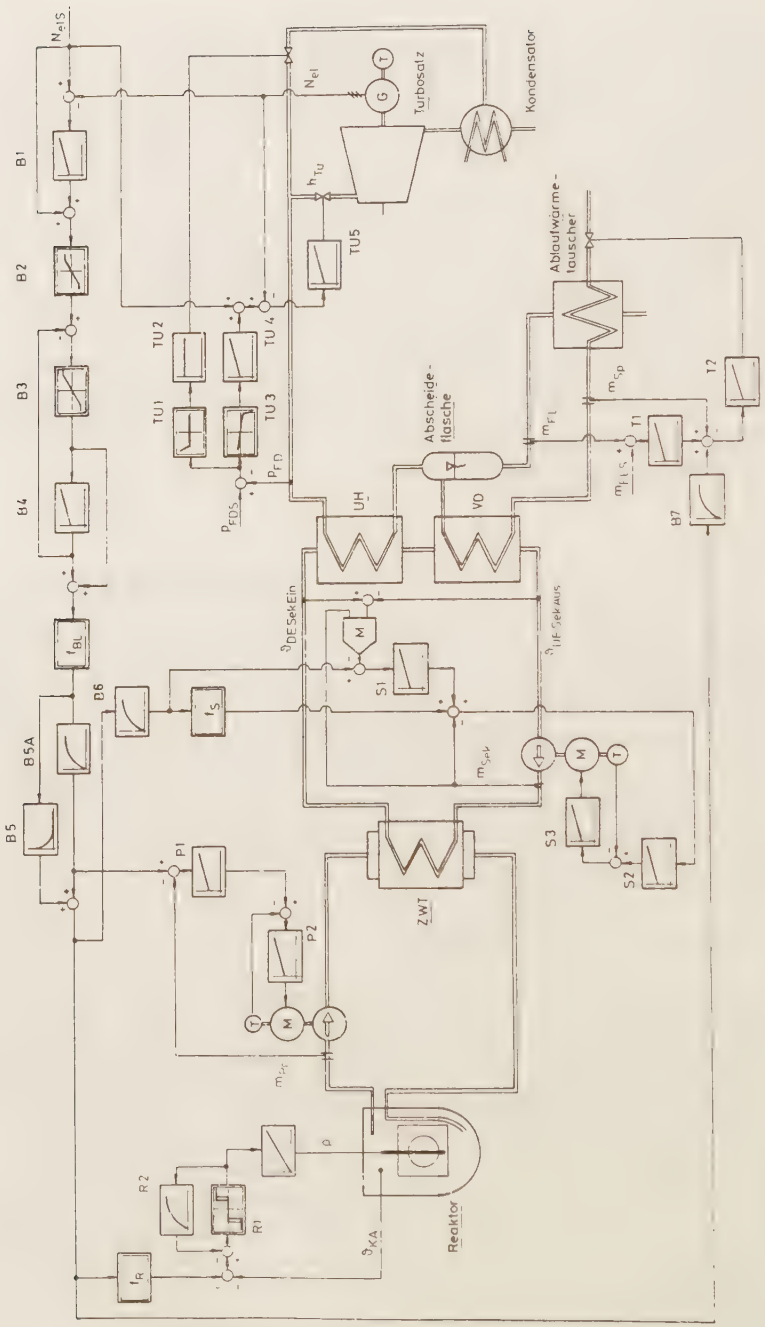



Bild 6.1.2. Gesamtes Regelungskonzept der konventionellen Leistungsregelung

*Durchsatzregelung des Sekundärkreises*

Zu der Durchsatzregelung des Sekundärkreises, die analog zu der des Primärkreises aufgebaut ist, wird zusätzlich eine thermische Leistungsregelung überlagert. Die thermische Leistung wird aus dem Produkt von Durchsatz und Temperaturdifferenz am Eingang und Ausgang des Dampferzeugers gebildet und entspricht der dem Dampferzeuger zugeführten thermischen Leistung. Die Umrechnung des Leistungssollwertes in Durchsatzsollwert erfolgt im Block $f_S$.

*Durchsatzregelung des Speisewassers*

Da die Abscheidemenge ein Maß für den Dampfgehalt ist und daher den Bedarf des Speisewasserdurchsatzes bestimmt, wird die Regelung der Ablaufmenge als Kaskadenschaltung der Durchsatzregelung aufgeschaltet. Der Speisewassersollwert entspricht dem thermischen Leistungssollwert im jeweiligen Lastzustand.

Tabelle 6.1.1. Reglerparameter der konventionellen Leistungsregelung nach Bild 6.1.2.

| Regler | Parameter | Einstellwert |
|---|---|---|
| TU1 | VRTU1 | 0 , wenn $\Delta p_{FD} \geq -9$ bar |
| | | 1 , wenn $\Delta p_{FD} < -9$ bar |
| TU2 | VRTU2 | 0,5 |
| TU3 | VRTU3 | 0,01, wenn $\Delta p_{FD} \leq 9$ bar |
| | | 0,3, wenn $\Delta p_{FD} > 9$ bar |
| TU4 | VRTU4 | 1,2 |
| | TIRTU4 | 100 s |
| TU5 | VRTU5 | 0,7 |
| | TIRTU5 | 6,5 s |
| B1 | VRB1 | 0,5 |
| | TIRB1 | 60 s |
| B4 | VRB4 | 0 |
| | TIRB4 | 60 s |
| B5A | TAUB5A | 20 s |
| B5 | TDRB5 | 10 s |
| B6 | TAUB6 | 4 s |
| B7 | TAUB7 | 10 s |

Fortsetzung Tabelle 6.1.1.

| Regler | Parameter | Einstellwert |
|---|---|---|
| R1 | WAB | 0,00183/2 (≙ 0,5° K) |
| | WAN | 0,00366/2 (≙ 1,0° K) |
| R2 | VRR2 | 0,045 |
| | TAURR2 | 3, s |
| B8 | VRB8 | 1 |
| | TAURB8 | 10 s |
| P1 | VRP1 | 1 |
| | TIRP1 | 1,6 s |
| P2 | VRP2 | 4 |
| | TIRP2 | 1,5 s |
| B7 | VRB7 | 1 |
| | TAUB7 | 4 s |
| S1 | VRS1 | 5 |
| | TIRS1 | 6 s |
| S2 | VRS2 | 1,2 |
| | TIRS2 | 3,5 s |
| S3 | VRS3 | 4 |
| | TIRS3 | 1, 6 s |
| T1 | VRT1 | 0,1 |
| | TIRT1 | 30 s |
| T2 | VRT2 | 0,1 |
| | TIRT2 | 10 |

Reglerstruktur:

$$G_{PI}(s) = VR \left(1 + \frac{1}{s \cdot TIR}\right)$$

$$G_{PDT_1}(s) = VR \left(\frac{1 + s\ TDR}{1 + s\ TAU}\right)$$

$$G_{PT_1}(s) = VR \frac{1}{1 + s \cdot TAU}$$

## 6.2. Regelverhalten

Das Regelverhalten wurde mit den in Tabelle 6.1.1 angegebenen Reglerparametern am mathematisch-physikalischen Modell und am vereinfachten mathematischen Modell untersucht. Die Reglerparameter wurden dabei mittels geeigneter Gütekriterien optimiert, so daß im gesamten Arbeitsbereich ein gutes Führungsverhalten bei ausreichendem Störverhalten erreicht wird.

Das gewählte Gütekriterium des Reaktors

$$I_1 = \int_0^\infty \left[ |e_1| t + k(m_{Pr\infty}\vartheta_{KA\infty} - m_{Pr}\vartheta_{KA}) \right] dt \qquad (6.2.1)$$

bewertet neben der Kernaustrittstemperatur $\vartheta_{KA}$ auch ein mit einem Faktor k gewichtetes Maß der thermischen Leistung des Reaktors, um eine gleichmäßige Änderung der Kernaustrittstemperatur $\vartheta_{KA}$ und Reaktorleistung zu erhalten. Die bleibende Regelabweichung, die durch die Totzone des Dreipunktschalters des quasistetigen PI-Reglers zustande kommt, wird im Gütekriterium dadurch ungangen, daß der Fehler $e_1$ wie folgt errechnet wird:

$$e_1 = \vartheta_{KA\infty} - \vartheta_{KA} \quad \text{für } |\vartheta_{KA\infty} - \vartheta_{KA}| \geq 1^\circ K \qquad (6.2.2)$$

$$e_1 = 0 \quad \text{für } |\vartheta_{KA\infty} - \vartheta_{KA}| < 1^\circ K \qquad (6.2.3)$$

Für die restlichen Regelungen wurde als Gütekriterium das IAE-Kriterium

$$I_2 = \int_0^\infty |e_2| dt \qquad (6.2.4)$$

verwendet, wobei $e_2$ die jeweilige Regelabweichung darstellt.

Die im Anhang P dargestellten Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmung des dynamischen Verhaltens zwischen dem mathematisch-physikalischen und mathemaitschen Modell. Die Modellungenauigkeit beruht hauptsächlich auf dem richtungsabhängigen Streckenverhalten des mathematisch-physikalischen Modells, das auf folgende Ursachen

zurückzuführen ist:

1. Last- und Richtungsabhängigkeit der nichtlinearen Regelstrecke;
2. konstante Reglerparameter.

Dagegen stellt sich das Regelverhalten des vereinfachten mathematischen Modells als mittleres Verhalten der positiven und negativen Führungsänderung dar.

Bei Teillast treten offensichtlich Schwingungen auf, die zum Teil sehr langsam abklingen. Sie können nur auf Kosten des nominalen Führungsverhaltens verbessert werden. Als nominales Führungsverhalten wird ein gewünschtes Verhalten (als Bezugsfall) bei einem bestimmten Lastpunkt (z. B. 100%) definiert.

Insgesamt betrachtet kann die Übereinstimmung des Regelverhaltens für beide Fälle einerseits mittels des mathematisch-physikalischen Modells andererseits mittels des vereinfachten mathematischen Modells, als völlig befriedigend für eine praktische Anwendung angesehen werden.

# 7. Der Entwurf und die Erprobung eines optimalen Zustandsreglers mit Beobachter

Wenn eine kontinuierliche Regelstrecke durch einen Prozeßrechner gesteuert wird, stehen die Zustandsgrößen und Steuergrößen aufgrund der Abtastung nur zu festen Zeitpunkten zur Verfügung, und die Regelstrecke wird mit stückweise konstanten Steuergrößen geregelt (Ackermann (1972), Föllinger (1974)). Die Optimierung erfolgt zweckmäßigerweise mit Hilfe eines in diskreter Form transformierten Gütefunktionals analog zum kontinuierlichen Fall.

## 7.1. Optimaler Zustandsregler

Das im Abschnitt 5 ermittelte lineare zeitinvariante mathematische Zustandsraummodell läßt sich in der zeitdiskreten Form

$$\underline{x}(k+1) = \underline{A}\,\underline{x}(k) + \underline{B}\,\underline{u}(k), \quad \underline{x}(0) = \underline{x}_0 \tag{7.1.1}$$

und

$$\underline{y}(k) = \underline{C}\,\underline{x}(k) \tag{7.1.2}$$

darstellen.
Die Matrizen und Vektoren sind dabei wie folgt definiert:

| | | |
|---|---|---|
| $\underline{x}$ | [nx1] | Zustandsvektor, |
| $\underline{u}$ | [mx1] | Steuervektor, |
| $\underline{y}$ | [rx1] | Ausgangsvektor, |
| $\underline{A}$ | [nxn] | Systemmatrix, |
| $\underline{B}$ | [nxm] | Steuermatrix, |
| $\underline{C}$ | [rxn] | Ausgangsmatrix. |

Es wird vorausgesetzt, daß $r \leq m \leq n$ gilt, $\underline{u}(k)$ nicht beschränkt ist, und ferner das System stabilisierbar (Kwakernaak und Sivan (1972)) ist. Das Regelungsproblem des Zustandsreglers besteht nun darin,

den Zustansvektor $\underline{x}(k)$ nach einer anfänglichen Störung zum Zeitpunkt k=O mit einer Steuerfunktion $\underline{u}(k)$ im Intervall $O \leq k < N$ in die Ruhelage $\underline{x}(k)$ zu überführen, derart, daß das Gütefunktional

$$I[\underline{x}_O, \underline{u}(k)] = \frac{1}{2}\,\underline{x}^T(N)\,\underline{S}\,\underline{x}(N) + \frac{1}{2}\sum_{k=O}^{N-1}\{\underline{x}^T(k)\,\underline{Q}\,\underline{x}(k) + 2\underline{u}^T(k)\,\underline{M}\,\underline{x}(k) + \underline{u}^T(k)\,\underline{R}\,\underline{u}(k)\} \qquad (7.1.3)$$

einen minimalen Wert annimmt. Aufgrund der quadratischen Form der Gl.(7.1.3) werden große Abweichungen stärker gewichtet als kleine Abweichungen.

Die Kreuzbewertungsmatrix $\underline{M}$, die durch Diskretisierung des kontinuierlichen Gütefunktionals entstanden ist (Unbehauen (1981)), ist positiv semidefinit. Die Bewertungsmatrizen $\underline{S}$ und $\underline{Q}$ für die Zustandsgrößen $\underline{x}$ sind symmetrisch und ebenfalls positiv semidefinit, die symmetrische Bewertungsmatrix $\underline{R}$ für die Steuergrößen $\underline{y}$ ist positiv definit. Damit ist die Existenz der optimalen Steuerfunktion $\underline{u}(k)$ vorausgesetzt.

Wendet man die Variationsrechnung auf das System nach Gl.(7.1.1) und das Gütefunktional nach Gl.(7.1.3) an, um die Optimierungsaufgabe zu lösen, so erhält mán als optimalen Steuervektor

$$\underline{u}(k) = -\underline{R}^{-1}\{\underline{B}^T\underline{K}(k+1)\,\underline{x}(k+1) + \underline{M}\,\underline{x}(k)\} \qquad (7.1.4)$$

$$= -\underline{R}^{-1}\{\underline{B}^T\underline{K}(k+1)[\underline{A}\,\underline{x}(k) + \underline{B}\,\underline{u}(k)] + \underline{M}\,\underline{x}(k)\} \qquad (7.1.5)$$

$$= -\{\underline{R} + \underline{B}^T\underline{K}(k+1)\,\underline{B}\}^{-1}\{\underline{M} + \underline{B}^T\underline{K}(k+1)\,\underline{A}\}\underline{x}(k) \qquad (7.1.6)$$

Die Bestimmung der positiv semidefiniten Matrix $\underline{K}(k)$ erfolgt durch Lösung der diskreten Matrix-Riccati-Gleichung:

$$\underline{K}(k) = \underline{Q} + \underline{A}^T\underline{K}(k+1)\underline{A} - \{\underline{M} + \underline{B}^T\underline{K}(k+1)\underline{A}\}^T\{\underline{R} + \underline{B}^T\underline{K}(k+1)\underline{B}\}^{-1}\{\underline{M} + \underline{B}^T\underline{K}(k+1)\underline{A}\}, \qquad (7.1.7)$$

Die Randbedingung dieser Gleichung lautet bekanntlich (Unbehauen (1981))

$$\underline{K}(N) = \underline{S} \ . \tag{7.1.8}$$

Für den Fall "N→∞" vereinfacht sich das Gütefunktional zu:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \underline{x}^T(k)\underline{Q}\ \underline{x}(k) + 2\underline{u}^T(k)\underline{M}\ \underline{x}(k) + \underline{u}^T(k)\ \underline{R}\ \underline{u}(k) \ , \tag{7.1.9}$$

da $\underline{x}(\infty)$ gegen Null konvergiert, und die Matrix $\underline{K}(k)$ einen Grenzwert $\hat{\underline{K}}$ annimmt, der sich als stationäre Lösung der algebraischen Riccati-Gleichung

$$\hat{\underline{K}} = \underline{Q} + \underline{A}^T\hat{\underline{K}}\ \underline{A} - \{\underline{M} + \underline{B}^T\hat{\underline{K}}\ \underline{A}\}^T\{\underline{R} + \underline{B}^T\hat{\underline{K}}\ \underline{B}\}^{-1}\{\underline{M} + \underline{B}^T\hat{\underline{K}}\ \underline{A}\} \tag{7.1.10}$$

berechnen läßt (Hewer (1971), Vaughan (1970), Caines und Mayne (1970, 1971)).

Das Regelgesetz nach Gl.(7.1.6) wird nun zeitinvariant:

$$\underline{u}(k) = -\{\underline{R} + \underline{B}^T\hat{\underline{K}}\ \underline{B}\}^{-1}\{\underline{M} + \underline{B}^T\hat{\underline{K}}\ \underline{A}\}\ \underline{x}(k) \tag{7.1.11}$$

bzw.

$$\underline{u}(k) = \underline{F}\ \underline{x}(k) \tag{7.1.12}$$

mit

$$F = -\{\underline{R} + \underline{B}^T\hat{\underline{K}}\ \underline{B}\}^{-1}\{\underline{M} + \underline{B}^T\hat{\underline{K}}\ \underline{A}\}\ \underline{x}(k) \tag{7.1.13}$$

## 7.2. Erweiterung des optimalen Zustandsreglers durch Führungs- grössen- und Störgrössenaufschaltung

Da unter dem Einfluß von Führungs- und Störgrößen das Gütefunktional nach Gl.(7.1.9) nicht konvergiert und sich daher eine Minimierung bezüglich des Stellvektors $\underline{u}(k)$ nicht durchführen läßt, muß das Gütefunktional entsprechend modifiziert werden.

Führungsgrößenregelung

Definiert man einen erweiterten Zustandsvektor

$$\tilde{\underline{x}}(k) = \begin{bmatrix} \underline{e}(k) \\ \underline{e}(k+1) - \underline{e}(k) \\ \underline{x}'(k+1) - \underline{x}'(k) \end{bmatrix} \tag{7.2.1}$$

mit dem Vektor der Regelabweichung $\underline{e}$, der sich als Differenz zwischen dem Vektor der Führungsgrößen $\underline{w}(k)$ und dem der Ausgangsgrößen $\underline{y}(k)$ ergibt,

$$\underline{e}(k) = \underline{w}(k) - \underline{y}(k) \tag{7.2.2}$$

und dem transformierten (n-r)-dimensionalen Teilvektor

$$\underline{x}'(k) = \underline{M}^*\underline{x}(k), \quad \underline{M}^* \text{ (n-r)x n Transformationsmatrix} \tag{7.2.3}$$

sowie einen neuen Steuervektor

$$\underline{v}(k) = \underline{u}(k+1) - \underline{u}(k) \ , \tag{7.2.4}$$

so erfüllen die beiden Vektoren die Konvergenzbedingung

$$\lim_{k\to\infty} \tilde{\underline{x}}(k) = \underline{0} \tag{7.2.5}$$

$$\lim_{k\to\infty} \underline{v}(k) = \underline{0}. \tag{7.2.6}$$

Um für das erweiterte System die Symstemmatrix $\tilde{\underline{A}}$ sowie die Eingangsmatrix $\tilde{\underline{B}}$ zu bestimmen, wird das ursprüngliche System so transformiert, daß $\underline{x}'(k)$ und $\underline{y}(k)$ Teilvektoren eines neuen Zustandsvektors sind:

$$\underline{x}''(k) = \begin{bmatrix} -\underline{y}(k) \\ \underline{x}'(k) \end{bmatrix} \tag{7.2.7}$$

$$= \begin{bmatrix} -\underline{C} \\ \underline{M}^* \end{bmatrix} \underline{x}(k) \tag{7.2.8}$$

$$= \underline{T}\ \underline{x}(k) \ . \tag{7.2.9}$$

Das transformierte System wird dann beschrieben durch:

$$\underline{x}''(k+1) = \underbrace{\underline{T}\,\underline{A}\,\underline{T}^{-1}}\,\underline{x}''(k) + \underbrace{\underline{T}\,\underline{B}}\,\underline{u}(k) \qquad (7.2.10)$$

$$= \underline{A}'' \quad \underline{x}''(k) + \underline{B}''\,\underline{u}(k) \; . \qquad (7.2.11)$$

Durch Aufteilen der transformierten Systemmatrix $\underline{A}''$ und Steuermatrix $\underline{B}''$ in Untermatrizen

$$\underline{A}'' = \left[\begin{array}{c|c} \underline{A}''_{11} & \underline{A}''_{12} \\ \hline \underline{A}''_{21} & \underline{A}''_{22} \end{array}\right] \qquad (7.2.12)$$

$$\underline{B}'' = \begin{bmatrix} \underline{B}''_1 \\ \underline{B}''_2 \end{bmatrix} \qquad (7.2.13)$$

erhält man aus Gl.(7.2.11)

$$\{\underline{x}'(k+2) - \underline{x}'(k+1)\} = \underline{A}''_{22}\{\underline{x}'(k+1) - \underline{x}'(k)\} - \underline{A}''_{21}\{\underline{y}(k+1) - \underline{y}(k)\}$$
$$+ \underline{B}''_2\{\underline{u}(k+1) - \underline{u}(k)\} \qquad (7.2.14)$$

$$\{\underline{y}(k+2) - \underline{y}(k+1)\} = -\underline{A}''_{12}\{\underline{x}'(k+1) - \underline{x}'(k)\} + \underline{A}''_{11}\{\underline{y}(k+1) - \underline{y}(k)\}$$
$$- \underline{B}''_1\{\underline{u}(k+1) - \underline{u}(k)\} \qquad (7.2.15)$$

Unter der Voraussetzung, daß die Führungsgröße $\underline{w}$ konstant ist, ergeben sich die Teilvektoren des erweiterten Zustandsvektors $\tilde{\underline{x}}(k+1)$ zu:

$$\underline{e}(k+1) = \underline{e}(k) + \{\underline{e}(k+1) - \underline{e}(k)\} \qquad (7.2.16)$$

$$\{\underline{e}(k+2) - \underline{e}(k+1)\} = -\underline{y}(k+2) + \underline{y}(k+1)$$
$$= \underline{A}''_{12}\{\underline{x}'(k+1) - \underline{x}'(k)\} + \underline{A}''_{11}\{\underline{e}(k+1) - \underline{e}(k)\}$$
$$+ \underline{B}''_1\,\underline{v}(k) \qquad (7.2.17)$$

$$\{\underline{x}'(k+2) - \underline{x}'(k+1)\} = \underline{A}''_{22}\{\underline{x}'(k+1) - \underline{x}'(k)\} + \underline{A}''_{21}\{\underline{e}(k+1) - \underline{e}(k)\}$$
$$+ \underline{B}''_2 \ \underline{v}(k) \qquad (7.2.18)$$

Werden die Beziehungen der Gln.(7.2.16) bis (7.2.18) zusammengefaßt, so erhält man unter Beachtung von Gl.(7.2.1) schließlich:

$$\tilde{\underline{x}}(k+1) = \left[\begin{array}{c|cc} \underline{I} & \underline{I} & \underline{O} \\ \underline{O} & \underline{A}''_{11} & \underline{A}''_{12} \\ \underline{O} & \underline{A}''_{21} & \underline{A}''_{22} \end{array}\right] \tilde{\underline{x}}(k) + \left[\begin{array}{c} \underline{O} \\ \underline{B}''_1 \\ \underline{B}''_2 \end{array}\right] \underline{v}(k) \qquad (7.2.19)$$

$$= \tilde{\underline{A}} \ \tilde{\underline{x}}(k) + \tilde{\underline{B}} \ \underline{v}(k) \qquad (7.2.20)$$

Das erweiterte System kann dann anhand des Gütekriteriums

$$I = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \{\tilde{\underline{x}}^T(k)\tilde{\underline{Q}}\ \tilde{\underline{x}}(k) + 2\underline{v}^T(k)\ \tilde{\underline{M}}\ \tilde{\underline{x}}(k) + \underline{v}^T(k)\ \tilde{\underline{R}}\ \underline{v}(k)\} \overset{!}{=} \text{Min} \qquad (7.2.21)$$

optimiert werden, woraus sich die optimale Stellfunktion $\underline{v}(k)$ als proportionale Rückführung des erweiterten Zustandsvektors $\tilde{\underline{x}}(k)$ ergibt:

$$\underline{v}(k) = \tilde{\underline{F}}\ \tilde{\underline{x}}(k) \qquad (7.2.22)$$

mit

$$\tilde{\underline{F}} = -\{\tilde{\underline{R}} + \tilde{\underline{B}}^T\tilde{\underline{K}}\ \tilde{\underline{B}}\}^{-1}\ \{\tilde{\underline{M}} + \tilde{\underline{B}}^T\ \tilde{\underline{K}}\ \tilde{\underline{A}}\} \qquad (7.2.23)$$

Dabei stellt $\underline{K}$ die stationäre Lösung der entsprechenden diskreten Matrix-Riccati-Gleichung dar.
Nach Einsetzen der Gl.(7.2.1) in Gl.(7.2.22) erhält man mit

$$\tilde{\underline{F}} = [\underline{F}_1 \mid \underline{F}_2 \mid \underline{F}_3] \qquad (7.2.24)$$

das optimale Stellgesetz

$$\underline{v}(k) = \underline{F}_1\underline{e}(k) + \underline{F}_2\{\underline{e}(k+1) - \underline{e}(k)\} + \underline{F}_3\{\underline{x}'(k+1) - \underline{x}'(k)\} \quad (7.2.25)$$

Durch Einsetzen der Gln.(7.2.3) und (7.2.4) in Gl.(7.2.25) ergibt sich die optimale Stellgröße

$$\underline{u}(k+1) = \underline{F}_1\underline{e}(k) + \underline{F}_2\{\underline{e}(k+1) - \underline{e}(k)\} + \underline{F}_3\{\underline{x}'(k+1) - \underline{x}'(k)\} + \underline{u}(k) \quad (7.2.26)$$

$$\begin{aligned} &= \underline{F}_1\underline{e}(k) + \underline{F}_2\{\underline{e}(k+1) - \underline{e}(k)\} + \underline{F}_3\{\underline{x}'(k+1) - \underline{x}'(k)\} \\ &+ \underline{F}_1\underline{e}(k-1) + \underline{F}_2\{\underline{e}(k) - \underline{e}(k-1)\} + \underline{F}_3\{\underline{x}'(k) - \underline{x}'(k-1)\} \\ &\quad \vdots \\ &+ \underline{F}_1\,\underline{e}(0) + \underline{F}_2\{\underline{e}(1) - \underline{e}(0)\} + \underline{F}_3\{\underline{x}'(1) - \underline{x}'(0)\} + \underline{u}(0) \end{aligned} \quad (7.2.27)$$

$$= \underline{F}_1 \sum_{i=0}^{k} \underline{e}(i) + \underline{F}_2\underline{e}(k+1) + \underline{F}_3\,\underline{x}'(k+1) - \underline{F}_2\underline{e}(0) - \underline{F}_3\underline{x}'(0) + \underline{u}(0) \quad (7.2.28)$$

bzw. zum Zeitpunkt k und speziell für w=0 unter Verwendung der Gln. (7.2.2) und (7.2.3)

$$\underline{u}(k) = \underline{F}_1 \sum_{i=0}^{k-1} \underline{e}(i) - \underline{F}_2\underline{y}(k) + \underline{F}_3\underline{M}^*\underline{x}(k) + \{\underline{F}_2\underline{C} - \underline{F}_3\underline{M}^*\}\underline{x}(0) + \underline{u}(0) \quad (7.2.29)$$

Demnach enthält das optimale Stellgesetz eine proportionale Ausgangs- und Zustandsrückführung, eine Summation der Regelabweichung, die einer integralen Rückführung der Regelabweichung entspricht, und die noch zu spezifizierenden Anfangsbedingungen.

Der optimale Anfangswert $\underline{u}(0)$ ergibt sich dadurch, indem der minimale Wert des Gütefunktionals gemäß Gl.(7.2.21), also

$$I_{min} = \frac{1}{2}\,\tilde{\underline{x}}^T(0)\,\tilde{\underline{K}}\,\tilde{\underline{x}}(0)\ , \quad (7.2.30)$$

bezüglich $\underline{u}(0)$ minimiert wird. Unter Berücksichtigung der Gln.(7.2.1) (7.2.7) und (7.2.9) folgt für den Anfangswert des erweiterten Zustandsvektors

$$\tilde{\underline{x}}(0) = \begin{bmatrix} \underline{w} - \underline{y}(0) \\ -\underline{y}(0) + \underline{y}(1) \\ \underline{x}'(1) - \underline{x}'(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{w} - \underline{C}\,\underline{x}(0) \\ \underline{T}(\underline{A} - \underline{I})\underline{x}(0) + \underline{T}\,\underline{B}\,\underline{u}(0) \end{bmatrix} \tag{7.2.31}$$

Durch Einsetzen von Gl.(7.2.31) in Gl.(7.2.30) und Nullsetzen der Ableitung bezüglich $\underline{u}_o$:

$$\frac{\partial I_{min}}{\partial \underline{u}(0)} = \underline{B}^T\underline{T}\,\tilde{\underline{K}}_{21}\underline{w} - \underline{B}^T\underline{T}\,\tilde{\underline{K}}_{21}\underline{C}\,\underline{x}(0) + \underline{B}^T\underline{T}^T\tilde{\underline{K}}_{22}\underline{T}(\underline{A} - \underline{I})\underline{x}(0) + \underline{B}^T\underline{T}^T\tilde{\underline{K}}_{22}\underline{T}\,\underline{B}\,\underline{u}(0) \overset{!}{=} 0 \tag{7.2.32}$$

erhält man die notwendige Bedingung für die Existenz eines Minimums des Gütefunktionals:

$$\underline{u}(0) = \{\underline{B}^T\underline{T}^T\tilde{\underline{K}}_{22}\underline{T}\,\underline{B}\}^{-1}\underline{B}^T\underline{T}^T\{\tilde{\underline{K}}_{21}\underline{C}\,\underline{x}(0) - \tilde{\underline{K}}_{21}\underline{w} - \tilde{\underline{K}}_{22}\underline{T}(\underline{A} - \underline{I})\underline{x}(0)\}, \tag{7.2.33}$$

wobei die Matrix $\tilde{\underline{K}}$ in geeignete Untermatrizen aufgespaltet wurde:

$$\tilde{\underline{K}} = \left[\begin{array}{c|c} \tilde{\underline{K}}_{11} & \tilde{\underline{K}}_{12} \\ \hline \tilde{\underline{K}}_{21} & \tilde{\underline{K}}_{22} \end{array}\right] \quad . \tag{7.2.34}$$

Im speziellen Fall, daß sich die Regelstrecke zum Zeitpunkt k=0 in einem stationären Zustand befindet, muß die Bedingung

$$\underline{x}(0) = \underline{A}\,\underline{x}(0) + \underline{B}\,\underline{u}_S(0) \tag{7.2.35}$$

erfüllt sein, wobei $\underline{u}_S(0)$ den stationären Wert des Stellvektors beschreibt. Unter der Voraussetzung, daß die Pseudoinverse

$$\underline{B}^+ = (\underline{B}^T\,\underline{B})^{-1}\,\underline{B}^T \tag{7.2.36}$$

existiert, so daß gilt

$$\underline{u}_S(0) = -\underline{B}^+\,(\underline{A} - \underline{I})\underline{x}(0)\ , \tag{7.2.37}$$

vereinfacht sich Gl.(7.2.33) zu

$$\underline{u}(0) = \underline{u}_S(0) - \{\underline{B}^T\underline{T}^T\tilde{\underline{K}}_{22}\underline{T}\ \underline{B}\}^{-1}\ \underline{B}^T\underline{T}^T\tilde{\underline{K}}_{21}\{\underline{w} - \underline{C}\ \underline{x}(0)\} \qquad (7.2.38)$$

$$= \underline{u}_S(0) + \underbrace{\qquad\qquad}_{\underline{F}_w}\{\underline{w} - \underline{C}\ \underline{x}(0)\}\ . \qquad (7.2.39)$$

Für den praktischen Einsatz kann man im allgemeinen davon ausgehen, daß die Sollwertänderungen in einem ausreichend großen zeitlichen Abstand erfolgen, so daß Gl.(7.2.35) für den eingeschwungenen Zustand näherungsweise erfüllt ist. Im Hinblick auf die endgültige Regelungsstruktur (Bild 7.2.1.) ist es sinnvoll, die stationäre Stellgröße $\underline{u}_S(0)$ als Ausgangsgröße des Reglers zum Zeitpunkt k=0 in der folgenden Form darzustellen:

$$\underline{u}_S(0) = \underline{F}_1 \sum_{i=-\infty}^{-1} \underline{e}(i) - \underline{F}_2\ \underline{C}\ \underline{x}(0) + \underline{F}_3\underline{M}^*\underline{x}(0) + \underline{F}_w\underline{w}'\ , \qquad (7.2.40)$$

wobei $\underline{w}'$ einen "früheren" Sollwert darstellt, der die Beziehung:

$$\underline{w}' = \underline{C}\ \underline{x}(0) = \text{const} \qquad (7.2.41)$$

erfüllt.

Durch Einsetzen der Gln.(7.2.40) und (7.2.41) in Gl.(7.2.39) erhält man $\underline{u}(0)$ für Gl.(7.2.29). Dann ergibt sich als endgültiges Regelgesetz die optimale Stellgröße für einen stückweise konstanten Führungsvektor $\underline{w}$:

$$\underline{u}(k) = \underline{F}_1 \sum_{i=-\infty}^{k-1} \underline{e}(i) - \underline{F}_2\ \underline{y}(k) + \underline{F}_3\underline{M}^*\underline{x}(k) + \underline{F}_w\ \underline{w}\ . \qquad (7.2.42)$$

Störgrößenregelung

Berücksichtigt man eine sprungförmige Störgröße $\underline{z}(k)$, die durch das Störmodell

$$\underline{u}_z(k+1) = \underline{u}_z(k) = \underline{u}_z,\quad \underline{u}_z(0) = \underline{u}_{z0} \qquad (7.2.43)$$

beschrieben wird, so wird das diskrete System nach Gl.(7.2.1) und Gl.(7.2.2) wie folgt erweitert (vom Felde (1979), Juen (1979), Weihrich (1977), Müller und Lückel (1977)):

$$\underline{x}(k+1) = \underline{A}\,\underline{x}(k) + \underline{B}\,\underline{u}(k) + \underline{B}_z\underline{u}_z(k), \quad \underline{x}(0) = \underline{x}_0 \tag{7.2.44}$$

$$\underline{y}(k) = \underline{C}\,\underline{x}(k) \tag{7.2.45}$$

mit

$\underline{u}_z(k)$ [1x1] Störvektor,

$\underline{B}_z$ [nx1] Störmatrix.

Das für die optimale Führungsregelung abgeleitete Regelgesetz, Gl.(7.2.42), kann im Falle einer gemessenen Störgröße $\underline{u}_z$ um eine Störgrößenaufschaltung erweitert werden:

$$\underline{u}(k) = \underline{F}_1 \sum_{i=-\infty}^{k-1} \underline{e}(i) - \underline{F}_2\underline{y}(k) + \underline{F}_3\underline{M}^*\underline{x}(k) + \underline{F}_w\underline{w} + \underline{F}_z\underline{u}_z \tag{7.2.46}$$

Die Störaufschaltung bewirkt dabei, den Störeinfluß unmittelbar am Entstehungsort zu kompensieren. Daraus ergibt sich dann die Aufschaltmatrix $\underline{F}_z$ zu:

$$\underline{F}_z = -\underline{B}^+\underline{B}_z \tag{7.2.47}$$

Bild 7.2.1 zeigt das Blockschaltbild des optimalen Regelsystems für Führungs- und Störgrößenregelung.

## 7.3. Beobachter

Die Zustandsgrößen des mathematischen Modells sind außer den Ausgangsgrößen einer direkten Messung nicht zugänglich, so daß ein Beobachter zur Schätzung der Zustandsgrößen eingesetzt werden muß. Wegen der besseren Übersicht und der geringeren Empfindlichkeit gegen Meßrauschen wird ein vollständiger Identitätsbeobachter (Luenberger (1971), Ackermann (1976), Schmid (1974)) gewählt, der im Falle ge-

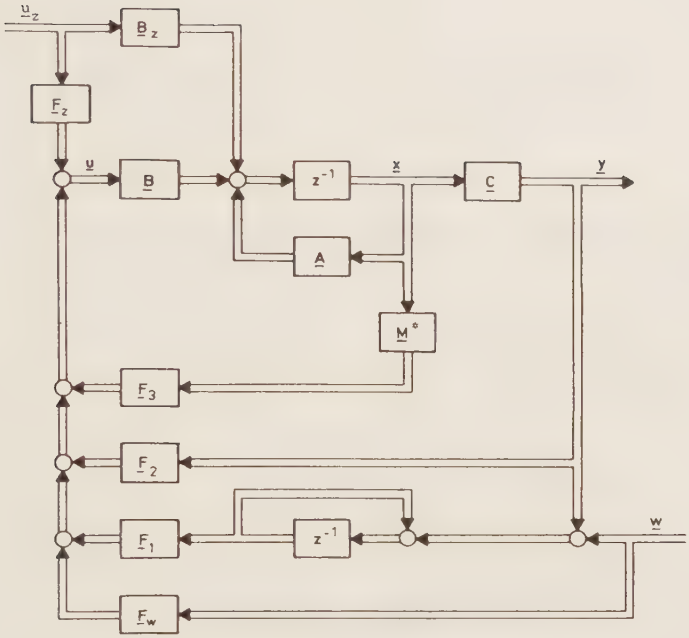



Bild 7.2.1. Optimales Regelsystem für Führungs- und Störgrößenregelung

messener Störgrößen in folgender Form dargestellt wird (Bild 7.3.1):

$$\underline{\hat{x}}(k+1) = \underline{D}\,\underline{\hat{x}}(k) + \underline{G}\,\underline{u}(k) + \underline{G}_z\,\underline{u}_z(k) + \underline{E}\,\underline{y}(k),\ \underline{x}(0) = \underline{x}_0 \quad (7.3.1)$$

mit

| | | |
|---|---|---|
| $\underline{D}$ | [nxn] | Beobachtersystemmatrix, |
| $\underline{G}$ | [nxm] | Beobachtersteuermatrix , |
| $\underline{G}_z$ | [nx1] | Beobachterstörmatrix, |
| $\underline{E}$ | [nxr] | Beobachterankopplungsmatrix. |

Dabei wird die Matrix $\underline{E}$ so bestimmt, daß die Matrix

$$\underline{D} = \underline{A} - \underline{E}\,\underline{C} \tag{7.3.2}$$

die vorgegebenen Eigenwerte besitzt. Durch eine geeignete Wahl der Eigenwerte kann das Einschwingverhalten des Beobachterfehlers

$$\underline{\tilde{e}} = x - \hat{x} \tag{7.3.3}$$

und eventuell auch die Parameterempfindlichkeit des Beobachters beeinflußt werden.

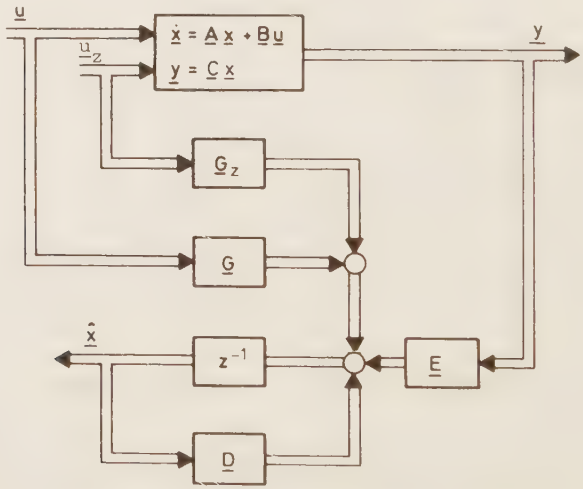



Bild 7.3.1. Blockschaltbild des vollständigen Identitätsbeobachters

## 7.4. "Robuste" Zustandsregelung

Für den Entwurf des Zustandsreglers und des Beobachters werden vor allem Kenntnisse über das Verhalten der Regelstrecke vorausgesetzt. Falls diese Voraussetzung nicht genügend erfüllt wird oder die Regelstrecke Parameteränderungen unterliegt, kann der Einsatz des Zustandsreglers und des Beobachters in Frage gestellt werden.

Die im Kapitel 5 ermittelten mathematischen Modelle geben, streng genommen, das dynamische Verhalten nur in einem bestimmten Arbeitspunkt wieder. Sobald der Arbeitspunkt sich ändert, weicht das Modellverhalten mehr oder weniger vom realen Streckenverhalten ab. Es besteht daher der Wunsch nach einem Regelsystem, das den Modellfehler beim Reglerentwurf berücksichtigt und beim Einsatz sinnvoll entgegenwirkt.

Obwohl zahlreiche adaptive Regelverfahren existieren, die Vorzüge gegenüber anderen Verfahren aufweisen, wird im vorliegenden Fall die Anpassung des Zustandsreglers an die parameterabhängige Regelstrecke wegen des zu großen Realisierungsaufwandes nicht durchgeführt. Der Aufwand einer adaptiven Regelung ist gewöhnlich nur dann zu vertreten, wenn ein relativ einfaches Streckenmodell vorliegt oder wenn das Streckenmodell eines komplexen Prozesses stark vereinfacht wird, was in vielen Fällen eine Reduktion der Modellgenauigkeit bedeuten würde. Stattdessen wird hier der Versuch unternommen, für den Zustandsregler bzw. den Beobachter bei festen Parametern robuste Eigenschaften zu erzielen. Es wird die Reduzierung der Parameterempfindlichkeit vorrangig betrachtet, weil die Störempfindlichkeit aufgrund der strukturellen Voraussetzung oft gleichzeitig oder alternativ vermindert wird. Eine Möglichkeit dazu besteht in der Einführung eines zusätzlichen Freiheitsgrades durch die Erweiterung der Struktur des Regelsystems, z. B. indem eine Empfindlichkeitsfunktion oder ein Fehlermaß in geeigneter Weise beim Reglerentwurf berücksichtigt wird (Frank (1976), Breinl (1980), Frank und Münzner (1978), Kreisselmeier und Grübel (1972)). Eine andere Möglichkeit ist, den vorhandenen Freiheitsgrad des Beobachters so zu dimensionieren, daß sich für das gewünschte Regelverhalten eine Parameterunempfindlichkeit ergibt, wobei die Grundstruktur der Zustandsregelung beibehalten wird (Unbehauen, Jun und Woelker (1982), Woelker (1980)).

### 7.4.1. Robuste Zustandsregelung ohne Strukturerweiterung

Das von Davison und Goldenberg (1975) vorgestellte Verfahren, das eine asymptotische Ausregelung auch bei Modellfehlern und Störungen

im Falle eines stabilen Gesamtsystems gewährleistet, stellt im Prinzip die Verallgemeinerung des klassischen PI-Reglers für Mehrgrößensysteme dar und bietet deshalb noch keine Möglichkeit, ein gewünschtes dynamisches Verhalten bzw. die Unempfindlichkeit hinsichtlich der Anstiegszeit, Überschwingweite und Ausregelzeit auch bei Modellfehlern zu gewährleisten.

Es wird nachfolgend ein Verfahren vorgestellt, bei dem der dynamische Regelfaktor gezielt zur Reduzierung der Empfindlichkeit des geschlossenen Regelkreises bei Änderung von Streckenparametern verwendet wird.

Die Theorie des sogenannten Funktional- oder Kontrollbeobachters (Luenberger (1971), Grübel (1977), Roman und Bullock (1975), Moore und Ledwich (1975)), der ausschließlich im Sinne eines guten Regelverhaltens ausgelegt wird und nur die zur Regelung benötigten Linearkombinationen der Zustandsgrößen rekonstruiert, liefert Aussagen zur Analyse der Zustandsregelung mit Beobachter mit Hilfe des *dynamischen Regelfaktors*. Ein Syntheseverfahren zu einer gezielten Reduzierung der Parameterempfindlichkeit wird in den oben genannten Arbeiten nicht angegeben.

Als Ansatzpunkt dient die Untersuchung der Empfindlichkeit von Zustandsreglern ohne Beobachter im Frequenzbereich (Böttiger (1975), Kreindler (1968), Perkins und Cruz (1971)). Hierin wird die Determinante der Rückführdifferenz-Matrix (MacFarlane (1970))

$$\underline{H}(s) = \underline{I} - \underline{F}(s\underline{I} - \underline{A})^{-1}\,\underline{B}\ , \qquad (7.4.1)$$

die durch die Systemmatrix $\underline{A}$ und die Eingangsmatrix $\underline{B}$ der Regelstrecke sowie durch die konstante Steuermatrix $\underline{F}$ des Zustandsreglers gegeben ist, als Vergleichsfunktion der Empfindlichkeit zwischen dem mit dem optimalen Zustandsregler geregelten System und dem nominal äquivalenten, offenen System verwendet. Ein *nominal*

*äquivalentes, offenes System* liegt vor, wenn im Nominalzustand zwischen dem geschlossenen und offenen Regelsystem folgende Beziehung gilt:

$$\underline{u}_{offen}(t) = \underline{u}_{geschl}(t) , \tag{7.4.2}$$

wobei die Indizes "offen" den offenen (bei Unterbrechung von $\underline{u}$) und "geschl" den geschlossenen Regelkreis bedeuten.

Zur Herleitung des Empfindlichkeitsmaßes wird das autonome System gemäß Bild 7.4.1 betrachtet. Dabei erhält man als

- nominale Regelstrecke

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A}\,\underline{x} + \underline{B}\,\underline{u},\ \underline{x}(0) = \underline{x}_o \tag{7.4.3}$$

$$\underline{y} = \underline{C}\,\underline{x} \tag{7.4.4}$$

- Beobachter

$$\dot{\hat{\underline{x}}} = \underline{D}\,\hat{\underline{x}} + \underline{G}\,\underline{u} + \underline{E}\,\underline{y},\ \hat{\underline{x}}(0) = \hat{\underline{x}}_o \tag{7.4.5}$$

mit den Bedingungen

1) die nominale Regelstrecke ist beobachtbar,
2) die Eigenwerte von $\underline{D}$ sind stabil
3) $\underline{D} = \underline{A} - \underline{E}\,\underline{C}$ (7.4.6)
4) $\underline{G} = \underline{B}$, (7.4.7)

- Zustandsregler

$$\underline{u} = \underline{F}_1\,\underline{v} - \underline{F}_2\,\underline{y} + \underline{F}_3\,\underline{M}^*\,\hat{\underline{x}} \tag{7.4.8}$$

$$\dot{\underline{v}} = -\underline{y} = -\underline{C}\,\underline{x}\,. \tag{7.4.9}$$

*) Im Nominalzustand entspricht das Verhalten des zu regelnden Systems genau dem eines nominalen vorgegebenen Modells, d. h. eines fest vorgegebenen Bezugssystems.

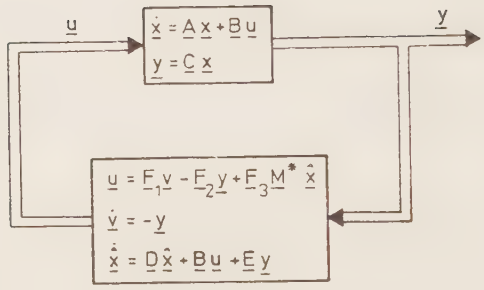



Bild 7.4.1. Autonomes Regelsystem

Das autonome System ist mit

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A}\,\underline{x} + \underline{B}\,\underline{u} = \underline{A}\,\underline{x} + \underline{B}(\underline{F}_1\,\underline{v} - \underline{F}_2\,\underline{y} + \underline{F}_3\,\underline{M}^*\,\hat{\underline{x}}) \tag{7.4.10}$$

$$= -\underline{B}\,\underline{F}_3\,\underline{M}^* + \underline{B}\,\underline{F}_1\,\underline{v} + (\underline{A} + \underline{B}\,\underline{F}_3\,\underline{M}^* - \underline{B}\,\underline{F}_2\,\underline{C})\,\underline{x} \tag{7.4.11}$$

darstellbar durch

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{e}} \\ \dot{\underline{v}} \\ \dot{\underline{x}} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|cc} \underline{D} & \multicolumn{2}{c}{\underline{O}} \\ \hline \underline{O} & \underline{O}_r & -\underline{C} \\ -\underline{B}\,\underline{F}_3\,\underline{M}^* & \underline{B}\,\underline{F}_1 & \underline{A} + \underline{B}\,\underline{F}_3\,\underline{M}^* - \underline{B}\,\underline{F}_2\,\underline{C} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \underline{e} \\ \underline{v} \\ \underline{x} \end{bmatrix}, \tag{7.4.12}$$

wobei als Beobachterfehler

$$\underline{e} = \underline{x} - \hat{\underline{x}} \tag{7.4.13}$$

definiert ist und durch folgende Beziehung beschrieben wird:

$$\dot{\underline{e}} = \dot{\underline{x}} - \dot{\hat{\underline{x}}} \tag{7.4.14}$$

$$= \underline{A}\,\underline{x} - \underline{D}\,\hat{\underline{x}} - \underline{E}\,\underline{y} \tag{7.4.15}$$

$$= \underline{A}\,\underline{x} - \underline{A}\,\hat{\underline{x}} + \underline{E}\,\underline{C}\,\hat{\underline{x}} - \underline{E}\,\underline{C}\,\underline{x} \tag{7.4.16}$$

$$= \underline{D}\,\underline{e}\,. \tag{7.4.17}$$

Das charakteristische Polynom des *geschlossenen Systems ohne* Beobachter, d. h. $\hat{\underline{x}} = \underline{x}$ und $\underline{e} = \underline{O}$, ist gegeben durch

$$P_{cx}(s) = \det \left[ s\underline{I} - \begin{bmatrix} \underline{O}_r & -\underline{C} \\ \underline{B}\ \underline{F}_1 & \underline{A} + \underline{B}\ \underline{F}_3\ \underline{M}^* - \underline{B}\ \underline{F}_2\ \underline{C} \end{bmatrix} \right], \tag{7.4.18}$$

und im Falle *mit* Beobachter durch

$$P_c(s) = P_B(s)\ P_{cx}(s), \tag{7.4.19}$$

wobei

$$P_B(s) = \det\ [s\underline{I} - \underline{D}] \tag{7.4.20}$$

das durch Polvorgabe frei vorgebbare charakteristische Polynom des Beobachters ist. Gl.(7.4.19) zeigt die Gültigkeit des Separationstheorems.

Für das *offene* System, das sich *ohne* Beobachter ($\hat{\underline{x}} = \underline{x}$) durch

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{v}} \\ \dot{\underline{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{O}_\ell & -\underline{C} \\ \underline{O} & \underline{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{v} \\ \underline{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{O} \\ \underline{B} \end{bmatrix} \underline{u} \tag{7.4.21}$$

und

$$\underline{u} = \left[\underline{F}_1 \,\vdots\, -\underline{F}_2\ \underline{C} + \underline{F}_3\ \underline{M}^*\right] \begin{bmatrix} \underline{v} \\ \underline{x} \end{bmatrix} \tag{7.4.22}$$

darstellen läßt, lautet das charakteristische Polynom

$$P_{ox}(s) = \det \left[ s\underline{I} - \begin{bmatrix} \underline{O}_r & -\underline{C} \\ \underline{O} & \underline{A} \end{bmatrix} \right] \tag{7.4.23}$$

$$= s^r\ P_S(s) \tag{7.4.24}$$

mit

$$P_S(s) = \det\ [s\underline{I} - \underline{A}]. \tag{7.4.25}$$

Für das *offene* System *mit* Beobachter gelten die Beziehungen (Gln. (7.4.3), (7.4.5) und (7.4.9)):

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A}\,\underline{x} + \underline{B}\,\underline{u}$$

$$\dot{\underline{v}} = -\underline{C}\,\underline{x}$$

$$\dot{\hat{\underline{x}}} = \underline{D}\,\hat{\underline{x}} + \underline{B}\,\underline{u} + \underline{E}\,\underline{y} = \underline{E}\,\underline{C}\,\underline{x} + \underline{D}\,\hat{\underline{x}} + \underline{B}\,\underline{u}. \tag{7.4.26}$$

Als erweiterte Zustandsdarstellung folgt hieraus

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{x}} \\ \dot{\underline{v}} \\ \dot{\hat{\underline{x}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{0} & \underline{0} \\ -\underline{C} & \underline{0}_r & \underline{0} \\ \underline{E}\,\underline{C} & \underline{0} & \underline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x} \\ \underline{v} \\ \hat{\underline{x}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{B} \\ \underline{0} \\ \underline{B} \end{bmatrix} \underline{u}. \tag{7.4.27}$$

Weiterhin gilt

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} -\underline{F}_2\,\underline{C} & \underline{F}_1 & \underline{F}_3\,\underline{M}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x} \\ \underline{v} \\ \hat{\underline{x}} \end{bmatrix}. \tag{7.4.28}$$

Gl.(7.4.27) läßt sich auch darstellen in der Form

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{e}} \\ \dot{\underline{v}} \\ \dot{\underline{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{D} & \underline{0} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0}_r & -\underline{C} \\ \underline{0} & \underline{0} & \underline{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{e} \\ \underline{v} \\ \underline{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{0} \\ \underline{0} \\ \underline{B} \end{bmatrix} \underline{u}. \tag{7.4.29}$$

Das zugehörige charakteristische Polynom lautet:

$$P_o(s) = s^r\, P_S(s)\, P_B(s). \tag{7.4.30}$$

Hierbei stellt gemäß Gl.(7.4.24) $s^r\, P_S(s)$ das charakteristische Polynom des offenen Systems *ohne* Beobachter dar. Gl.(7.4.30) zeigt, daß die für die Synthese entscheidende Separationseigenschaft des charakteristischen Polynoms auch bei offenem System gültig ist.

Aus den charakteristischen Polynomen des offenen und des geschlossenen Systems erhält man den *dynamischen Regelfaktor*, der gemäß der klassischen Theorie wie folgt definiert wird:

$$R(s) = \frac{\text{charakteristisches Polynom des offenen Kreises}}{\text{charakteristisches Polynom des geschlossenen Kreises}} \tag{7.4.31}$$

- für den Zustandsregler ohne Beobachter

$$R(s) = R_x(s) = \frac{s^r P_S(s)}{P_{cx}(s)} \tag{7.4.32}$$

- für den Zustandsregler mit Beobachter

$$R(s) = R_b(s) = \frac{s^r P_S(s) P_B(s)}{P_{cx}(s) P_B(s)} \tag{7.4.33}$$

$$= \frac{s^r P_S(s)}{P_{cx}(s)} . \tag{7.4.34}$$

Als wesentliches Ergebnis dieser Betrachtungen erhält man, daß sich der dynamische Regelfaktor R(s) beim Einsatz eines Luenberger-Beobachters nicht verändert. Der von Grübel (1977) eingeführte Beobachtereinflußfaktor existiert offensichtlich also nicht bzw. ist gleich Eins, da $R_x(s) \equiv R_b(s)$ gilt.

Für ein Eingrößensystem gemäß Bild 7.4.2 mit der Führungsübertragungsfunktion

$$G_F(s, G_S(s,\underline{p})) = \frac{Y(s)}{W(s)} , \tag{7.4.35}$$

ergibt sich bei Änderung der Übertragungsfunktion der Regelstrecke bzw. deren Parametern, die im Parametervektor $\underline{p}$ zusammengefaßt sind,

- die Bodesche Empfindlichkeitsfunktion

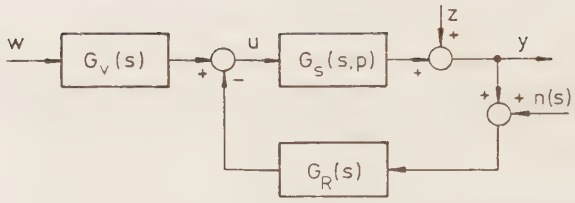



Bild 7.4.2. Regelkreisstruktur eines Eingrößensystems

$$S(s) = \frac{dG_F(s,G_S(s,\underline{p}))}{dG_S(s,\underline{p})} \frac{G_S(s,\underline{p})}{G_F(s,G_S(s,\underline{p}))}\Bigg|_{\underline{p}=\underline{p}_o} = \frac{1}{1+G_R(s)\ G_S(s,\underline{p})}; \tag{7.4.36}$$

wobei diese Empfindlichkeitsfunktion im vorliegenden Fall gerade identisch ist mit dem oben eingeführten dynamischen Regelfaktor, d. h.

$$R(s) \equiv S(s); \tag{7.4.37}$$

- die Störübertragungsfunktion

$$H_Z(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)} = G_Z(s)\ R(s); \tag{7.4.38}$$

- die Meßstörübertragungsfunktion

$$H_N(s) = \frac{Y(s)}{N(s)} = -G_o(s)\ R(s) \tag{7.4.39}$$

mit $G_o(s) = G_S(s)\ G_R(s)$.

Die Zustandsregelung besitzt die Eigenschaft, daß im gewünschten Frequenzbereich die Bedingung

$$|R(j\omega)| \leq 1 \tag{7.4.40}$$

erzielbar ist. Dies bedeutet, wie aus der klassischen Theorie für Eingrößensysteme bekannt ist, daß im betreffenden Frequenzbereich

eine Empfindlichkeitsreduzierung des geschlossenen Systems gegenüber dem nominal äquivalenten offenen System bewirkt wird. Allerdings bedeutet eine wünschenswerte niedrige Empfindlichkeit eines Regelkreises gegenüber Parameteränderungen der Regelstrecke in einem bestimmten Frequenzbereich eine Erhöhung der Empfindlichkeit in einem anderen Frequenzbereich. Um die Parameterempfindlichkeit zu reduzieren, ist es wünschenswert, daß zumindest die folgende Bedingung im betreffenden Frequenzbereich erfüllt wird:

$$|R(j\omega)| \not> 1 \ . \tag{7.4.41}$$

Der dynamische Regelfaktor R(s) ist zwar nicht völlig frei vorgebbar, da bei Eingrößensystemen mit einem Polüberschuß von mindestens 2 der Bodesche Betragsflächensatz (Krebs (1973))

$$\int_0^\infty \ln|R(j\omega)|\,d\omega = -\int_0^\infty \ln|1 + G_o(j\omega)|\,d\omega = 0 \tag{7.4.42}$$

stets gültig ist. Jedoch kann innerhalb der durch die Struktur des Regelsystems festgelegten Grenzen der Regelfaktor weitgehend frei vorgegeben werden.

Der dynamische Regelfaktor

$$R(s) = \frac{s^r \det[s\underline{I} - \underline{A}]}{\det\left[s\underline{I} - \begin{bmatrix} \underline{O}_r & -\underline{C} \\ \underline{B}\ \underline{F}_1 & \underline{A} + \underline{B}\ \underline{F}_3\ \underline{M}^* - \underline{B}\ \underline{F}_2\ \underline{C} \end{bmatrix}\right]} \ . \tag{7.4.43}$$

enthält im Nenner das durch Polvorgabe frei wählbare Polynom $P_{cx}(s)$ des geschlossenen Systems ohne Beobachter. Durch geschickte Wahl der Pole für das geschlossene System kann gewährleistet werden, daß in den gewünschten Frequenzbereichen stets $|R(j\omega)| \leq 1$ eingehalten wird.

Für die Durchführung dieses Entwurfs kann R(s) einerseits durch Vorgabe des nominalen Führungsverhaltens, andererseits durch Vorgabe

der gewünschten Anforderungen unter Berücksichtigung des Betragsflächensatzes festgelegt werden. Diese Festlegung erfolgt als Kompromiß beider Vorgaben mit Hilfe eines interaktiven Entwurfsprogrammes in wenigen, einfach durchzuführenden Korrekturschritten. Die Anforderungen beziehen sich dabei auf Parameterunempfindlichkeit sowie auf die Störunempfindlichkeit bei Störungen mit hochfrequenten Anteilen oder mit der Grenzfrequenz $\omega_g$. Bei diesem Vorgehen wird das bekannte Entwurfsverfahren zur Polvorgabe des Zustandsreglers mit der Einhaltung von Unempfindlichkeitsspezifikationen verknüpft.

Da - wie oben gezeigt wurde - der dynamische Regelfaktor völlig unabhängig von dem Beobachter ist, beeinflußt der für Nominalverhalten der Regelstrecke ausgelegte Beobachter überhaupt nicht das dynamische Verhalten des Gesamtsystems, falls Nominalverhalten der Regelstrecke vorliegt. Ändern sich jedoch die Parameter der Regelstrecke, dann wird der für Nominalverhalten ausgelegte Beobachter seine Funktion als Beobachter nicht mehr exakt wahrnehmen können, vielmehr wirkt er dann als Kompensator, also als Bestandteil des Reglers. Für diesen gestörten Fall wird nun der "bisherige" Beobachter natürlich die Dynamik des Gesamtsystems beeinflussen. Somit spielt hierbei die Wahl der Pol- und Nullstellen des Beobachters eine Rolle. Dabei hat sich nun gezeigt, daß es zweckmäßig ist,

- zur Erzielung von Parameterunempfindlichkeit die Beobachterpole gleich den Systempolen,

- zur Erzielung von Störunempfindlichkeit bei Störungen mit der Grenzfrequenz $\omega_g$ die Beobachterpole etwas links von den Systempolen je nach $\omega_g$

zu wählen. Die Beobachternullstellen liegen fast immer links der Beobachterpole. Eine Verschiebung der Beobachterpole bewirkt meist eine gleichsinnige Verschiebung der Beobachternullstellen.

Der so entworfene Regler stellt daher einen "robusten" PI-Zustandsregler dar, da sowohl eine dynamische als auch stationäre Unempfind-

lichkeit erzielt wird. Die später dargestellten Ergebnisse der praktischen Anwendung dieses Reglerentwurfs zeigen, daß ein Regler mit festen Parametern für verschiedene Systeme, deren Verhalten sich erheblich ändert, verwendbar ist.

Die Herleitung des dynamischen Regelfaktors für Mehrgrößensysteme stellt mathematisch keine Einschränkung dar, jedoch die Interpretation als Empfindlichkeitsmaß ist problematisch. Bei Mehrgrößensystemen stellt die Beziehung nach Gl.(7.4.40) entsprechend Perkins und Cruz (1971) eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für eine Empfindlichkeitsreduzierung gegenüber dem nominal äquivalenten offenen System im gesamten Frequenzbereich dar. Daher reicht das skalare Empfindlichkeitsmaß R(s) für Mehrgrößensysteme nicht aus, so daß der entworfene Regler anhand einer Simulationsstudie überprüft werden muß. Der Regelfaktor kann daher auch beim Entwurf von Mehrgrößensystemen als nützlicher Anhaltspunkt dienen.

### 7.4.2. Robuste Regelung durch Strukturerweiterung

Die Empfindlichkeit eines Regelsystems kann durch geeignete Wahl seiner Struktur erheblich beeinflußt werden. Dies erfolgt, wie von Breinl (1980), Kreisselmeier und Grübel (1972) dargestellt wird, durch Einführung von Empfindlichkeits- oder Vergleichsmodellen.

Für das von einem Parameter p abhängige System

$$\dot{\underline{x}}(t,p) = \underline{A}(p)\ \underline{x}(t,p) + \underline{B}(t,p),\ \underline{x}(t=0,p) = \underline{x}_o \quad *) \qquad (7.4.44)$$

wird mittels der Empfindlichkeitsvektorfunktion

$$\underline{s}(p) = \frac{d\underline{x}(p)}{dp} \qquad (7.4.45)$$

*) Der kürzeren Schreibweise wegen wird weiterhin auf t als Argument verzichtet.

ein *Empfindlichkeitsmodell* in der Umgebung eines nominalen Parameters $p_o$ definiert:

$$\dot{\underline{s}}(p_o)=\underline{A}(p_o)\,s(p_o)+\left.\frac{d\underline{A}(p)}{dp}\right|_{p=p_o}\underline{x}(p_o)+\left.\frac{d\underline{B}(p)}{dp}\right|_{p=p_o}\underline{u}(p_o)+\underline{B}(p_o)\left.\frac{d\underline{u}(p)}{dp}\right|_{p=p_o} \tag{7.4.46}$$

Das Empfindlichkeitsmodell bildet dann mit dem Nominalsystem ein erweitertes System

$$\begin{bmatrix}\dot{\underline{x}}(p_o)\\ \dot{\underline{s}}(p_o)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\underline{A}(p_o) & \underline{0}\\ \underline{A}_p & \underline{A}(p_o)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\underline{x}(p_o)\\ \underline{s}(p_o)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\underline{B}(p_o) & \underline{0}\\ \underline{B}_p & \underline{B}(p_o)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\underline{u}(p_o)\\ \underline{u}_p\end{bmatrix} \tag{7.4.47}$$

mit

$$\underline{A}_p=\left.\frac{d\underline{A}(p)}{dp}\right|_{p=p_o}, \tag{7.4.48}$$

$$\underline{B}_p=\left.\frac{d\underline{B}(p)}{dp}\right|_{p=p_o}, \tag{7.4.49}$$

$$\underline{u}_p=\left.\frac{d\underline{u}(p)}{dp}\right|_{p=p_o}. \tag{7.4.50}$$

Für das erweiterte System kann die Rückführmatrix

$$\underline{K}=\begin{bmatrix}\underline{K}_x\\ \underline{K}_s\end{bmatrix} \tag{7.4.51}$$

aus der Matrix-Riccati-Gleichung ermittelt werden, allerdings nur iterativ, da der Steuervektor $\underline{u}_p$ des Empfindlichkeitsmodells von der Rückführmatrix $\underline{K}_x$ abhängig ist:

$$\underline{u}_p = \left.\frac{d\underline{u}(p)}{dp}\right|_{p=p_o} = \underline{K}_x \; \underline{s}(p_o) \; . \tag{7.4.52}$$

Für den Steuervektor $\underline{u}$ gilt:

$$\underline{u}(p) = \underline{K}_x \; \underline{x}(p) + \underline{K}_s \; \underline{s}(p_o) \; . \tag{7.4.53}$$

Bei Verwendung eines *Vergleichsmodells* kann ein Reglerentwurf mit zwei Freiheitsgraden erfolgen. Im ersten Schritt wird ein optimaler Zustandsregler für ein nominales Streckenmodell ($p=p_o$)

$$\dot{\underline{x}}(p_o,\underline{u}_R) = \underline{A}(p_o) \; \underline{x}(p_o,\underline{u}_R) + \underline{B}(p_o) \; \underline{u}_R, \; x(t=0,p_o) = \underline{x}_o \tag{7.4.54}$$

entworfen, das nur durch den Steuervektor $\underline{u}_R$ beeinflußt wird. Im zweiten Schritt wird für die Zustandsgrößenabweichung als Fehlermaß

$$\tilde{\underline{x}} = \underline{x}(p,\underline{u}) - \underline{x}(p_o,\underline{u}_R) \tag{7.4.55}$$

eingeführt und für das Fehlersystem

$$\dot{\tilde{\underline{x}}} = \left[\underline{A}(p) \; \underline{x}(p,\underline{u}) + \underline{B}(p) \; \underline{u}\right] - \left[\underline{A}(p_o) \; \underline{x}(p_o,\underline{u}_R) + \underline{B}(p_o) \; \underline{u}_R\right] \tag{7.4.56}$$

$$= \underline{A}(p) \; \tilde{\underline{x}} + \underline{B}(p)\left[\underline{u} - \underline{u}_R\right] + \left[\underline{A}(p) - \underline{A}(p_o)\right] \; \underline{x}(p_o,\underline{u}_R) + \left[\underline{B}(p) - \underline{B}(p_o)\right] \underline{u}_R \tag{7.4.57}$$

ein zweiter Regler optimal im Sinne des bekannten Gütekriteriums entworfen. Dieses Verfahren berücksichtigt das Prinzip der nominalen Äquivalenz (Perkins und Cruz (1971), Kreisselmeier und Grübel (1972)) und besitzt den Vorteil, daß getrennte Optimierungen des nominalen Verhaltens und der Empfindlichkeit durchgeführt werden können.

Sind die Zustandsgrößen der Regelstrecke nicht meßbar und wird ein Beobachter zur Zustandsgrößenschätzung herangezogen, so ist die Verwendung des Empfindlichkeitsmodells nicht sinnvoll, da die geschätzten Zustandsgrößen nicht nur zur Regelung, sondern auch für das Empfindlichkeitsmodell verwendet werden. Es ist nicht ohne weiteres möglich, den Zustandsvektor $\underline{x}$ durch den vom Beobachter geschätzten Zustandsvektor $\hat{\underline{x}}$ zu ersetzen. Dagegen läßt sich das Verfahren mit Vergleichsmodell (Bild 7.4.3) für den Fall des Beobachtereinsatzes unter der Bedingung anwenden, daß der Beobachterfehler klein ist und für $t \to \infty$ gegen Null strebt. Aus Bild 7.4.3 folgt als Zustandsgleichung für die parameterabhängige Regelstrecke

$$\dot{\underline{x}}(p,\underline{u}) = \underline{A}(p)\ \underline{x}(pk\underline{u}) + \underline{B}(p)\ \underline{u} \qquad (7.4.58)$$

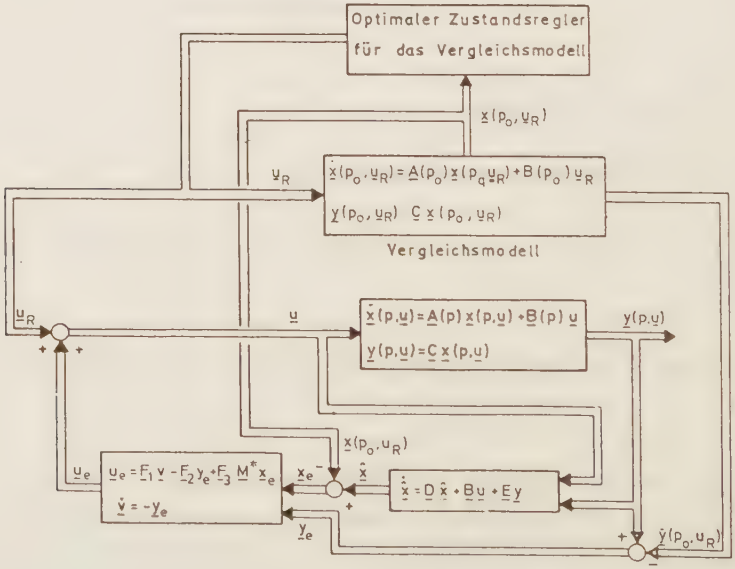



Bild 7.4.3. Robuste Zustandsregelung mit Vergleichsmodell beim Einsatz eines vollständigen Beobachters

und entsprechend für den vollständigen Beobachter nach Gl.(7.4.5)

$$\dot{\underline{\hat{x}}} = \underline{D}\ \underline{\hat{x}} + \underline{B}\ \underline{u} + \underline{E}\ \underline{y}. \tag{7.4.59}$$

Aus dem Vergleich mit einem dem nominalen Verhalten der Regelstrecke entsprechenden Bezugs- oder Vergleichsmodell für $p = p_o$, für das in einem ersten Schritt bereits ein optimaler Zustandsregler entworfen wurde, erhält man für die Zustandsgrößenabweichung $\underline{x}_e$ bzw. $\dot{\underline{x}}_e$:

$$\underline{x}_e = \underline{\hat{x}}(\underline{u},\underline{y}) - \underline{x}(p_o,\underline{u}_R) \tag{7.4.60}$$

$$\dot{\underline{x}}_e = \dot{\underline{\hat{x}}}(\underline{u},\underline{y}) - \dot{\underline{x}}(p_o,\underline{u}_R) \tag{7.4.61}$$

$$= [\underline{D}\ \underline{\hat{x}}(\underline{u},\underline{y}) + \underline{B}\ \underline{u} + \underline{E}\ \underline{y}] - [\underline{A}(p_o)\ \underline{x}(p_o,\underline{u}_R) + \underline{B}(p_o)\ \underline{u}_R]$$

$$= \underline{D}\ \underline{\hat{x}}(\underline{u},\underline{y}) - \underline{A}(p_o)\ \underline{\hat{x}}(\underline{u},\underline{y}) + \underline{A}(p_o)\ \underline{\hat{x}}(\underline{u},\underline{y}) - \underline{A}(p_o)\ \underline{x}(p_o,\underline{u}_R)$$

$$+ \underline{B}\ \underline{u} - \underline{B}(p_o)\ [\underline{u} - \underline{u}_e] + \underline{E}\ \underline{y}$$

$$= \underline{A}(p_o)\ \underline{x}_e + \underline{B}(p_o)\ \underline{u}_e + [\underline{D} - \underline{A}(p_o)]\ \underline{\hat{x}}(\underline{u},\underline{y})$$

$$+ [\underline{B} - \underline{B}(p_o)]\ \underline{u} + \underline{E}\ \underline{C}(p)\ \underline{x}. \tag{7.4.62}$$

In dieser Beziehung stellen auf der rechten Gleichungsseite die beiden ersten Terme das ungestörte Fehlersystem für die Zustandsgrößenabweichung dar, die restlichen Terme enthalten den Beobachtereinfluß. Führt man in die Terme für den Beobachtereinfluß den Beobachtungsfehler $\underline{e}$ nach Gl.(7.4.13) ein, so erkennt man leicht, daß der Beobachtungsfehler gegen Null strebt, wenn die Steuermatrix $\underline{B}$ und die Ankopplungsmatrix $\underline{E}$ des Beobachters an die Regelstrecke angepaßt werden, so daß vor allem die Luenberger Beobachterbedingungen

$$\underline{B} = \underline{B}(p) \tag{7.4.63}$$

und

$$\underline{A}(p) - \underline{E}\ \underline{C}(p) = \underline{D} \tag{7.4.64}$$

erfüllt sind. Die Anpassung der Beobachtermatrizen ist relativ einfach durchzuführen, wenn die Regelstrecke bekannt ist. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, so ist die Rückführung als eine dynamische Strecke zu betrachten und so zu dimensionieren, daß der Ausgangsfehler

$$\underline{y}_e = \underline{y}(p,\underline{u}) - \underline{y}(p_o,\underline{u}_R) \tag{7.4.65}$$

zwischen dem nominalen Vergleichsmodell und der Regelstrecke minimiert wird. Für das (ungestörte) Fehlersystem kann nun in gewohnter Weise ein Zustandsregler entworfen werden.

# 8. Simulationsergebnisse

Der erfolgreiche Einsatz eines Regelsystems an einem realen Prozeß hängt nicht nur von seiner Leistungsfähigkeit, sondern auch im gleichen Maße von dem für den Reglerentwurf zugrundegelegten Modell ab. Das (mathematische) Modell, das zweckmäßigerweise von niedriger Ordnung ist, soll die Dynamik des Prozesses mit großer Genauigkeit beschreiben. Die vorliegenden Simulationsuntersuchungen an mathematischen Modellen dienen daher zur Beurteilung der Modellgenauigkeit der reduzierten Reaktor- und Dampferzeugermodelle im geschlossenen Regelkreis und zur Beurteilung des Regelverhaltens der robusten optimalen Zustandsregelung. Das dynamische Verhalten des mathematisch-physikalischen Modells einschließlich der konventionellen Regler wurde am Digitalrechner CYBER 170/720 (Control Data Corporation) ermittelt. Die Simulation der mathematischen Modelle erfolgte am Analogrechner RA 800 (Telefunken), während die Regler am Prozeßrechner HP 2100A (Hewlett Packard) realisiert wurden.

Modellvergleich

Der Modellvergleich zwischen den mathematischen und mathematisch-physikalischen Modellen wurde im geschlossenen Regelkreis mit dem im Kapitel 6 dargestellten konventionellen Regelungskonzept (Bild 6.1.2) bei einer Leistungsänderung von +10 % bzw. -10 % der Nennleistung vorgenommen (Anhang P). Obwohl ihre Modellordnung und Strukturen sich voneinander stark unterscheiden, zeigen die beiden Modelle recht gute Übereinstimmung. Die vorhandenen Differenzen, die beim Dampferzeuger wegen der Komplexität des Prozesses größer sind als beim Reaktor, beruhen hauptsächlich auf der Richtungsabhängigkeit der Regelstrecke, deren Einfluß sowohl für den Reaktor als auch für den Dampferzeuger dadurch gekennzeichnet ist, daß bei einer positiven Leistungsänderung stärker oszillierendes Regelverhalten als bei einer negativen Leistungsänderung auftritt. Da bei der Erstellung der linearen Modelle nur die gemittelten Sprungantworten berücksichtigt wurden, zeigen die mathematischen Modelle ein mittleres Verhalten zwischen den positiven und negativen Laständerungen.

Zustandsregelung des Reaktors

Bei dem Entwurf des Zustandsreglers und Beobachters wurde die Reaktivität, wie bei der konventionellen Regelung, als Stellgröße und die Kernaustrittstemperatur als Regelgröße betrachtet. Die zweite Stellmöglichkeit, der Kühlmitteldurchsatz, wird neben der Reaktoreintrittstemperatur als Störgröße betrachtet und wird je nach dem Leistungsbedarf vom Blockleitregler vorgegeben. Dies gewährleistet, daß nicht nur die gewünschte Kühlmittelaustrittstemperatur des Reaktors, sondern auch die für die Erzeugung der gewünschten elektrischen Leistung erforderliche thermische Leistung tatsächlich an die benachbarten Komponenten übertragen wird. Das Führungsverhalten (Bilder Q.1a bis Q.1d im Anhang Q) zeigt, daß der optimale Zustandsregler sich trotz der zum Teil erheblichen Parameteränderungen der Regelstrecke im Teillastbereich recht robust verhält, wenn die Zustandsgrößen gemessen werden. Dabei wird erst bei 30 % Last das vom Nominalverhalten (das ist das Führungsverhalten bei 100 % Last, für die der Zustandsregler und Beobachter entworfen wurden) abweichende Verhalten erkennbar. Sind dagegen die Zustandsgrößen nicht meßbar und wird ein Beobachter für die Zustandsgrößenschätzung herangezogen, so wird das Regelverhalten bei Abweichung vom Nominalverhalten erheblich vom Beobachter beeinflußt. Es hat sich bei der Simulationsuntersuchung bestätigt, daß die mit dem im Kapitel 7.4.1 vorgestellten Verfahren entworfene Zustandsregelung zur Reduzierung der Parameterempfindlichkeit beiträgt. Das Führungsverhalten der robusten Zustandsregelung mit dem Beobachter zeigen die Bilder Q.2a bis Q.2d. Darin wird zwar bereits bei 50 % Last das vom Nominalverhalten abweichende Verhalten erkennbar, jedoch bleiben die Überschwingweite und Ausregelzeit in Grenzen. Das Störverhalten wird durch den Beobachtereinsatz nur unwesentlich verschlechtert (Bilder Q.3a bis Q.3d und Q.4a bis Q.4d). Über die parameterunempfindliche Eigenschaft hinsichtlich der Überschwingweite und Ausregelzeit hinaus besteht der Wunsch, ein Nominalverhalten auch bei Parameteränderung im Teillastbereich zu erzielen. Das im Kapitel 7.4.2 dargestellte Modellvergleichsverfahren bietet die Möglichkeit, durch geeignete Wahl des Zustandsreglers für das Fehler-

system den Zustandsgrößenfehler zu verringern. Mit der Anpassung des Beobachters, bei der die Beobachtermatrizen jeweils dem aktuellen Lastzustand so angepaßt werden, daß die Beobachterbedingungen erfüllt sind, kann ein nahezu nominales Verhalten im gesamten Arbeitsbereich erreicht werden (Bilder Q.5a bis Q.5d). Außerdem ergibt sich durch die getrennte Optimierung für Führungs- und Störungsregelung ein günstigeres Störverhalten als bei der Zustandsregelung ohne Strukturerweiterung (Bilder Q.6a bis Q.6d und Q.7a bis Q.7d). Wird dagegen im gesamten Arbeitsbereich ein konstanter Beobachter eingesetzt, so verschlechtert sich das Führungsverhalten geringfügig (Bilder Q.8a bis Q.8d), während sich das Störverhalten unwesentlich ändert (Bilder Q.9a bis Q.9d und Q.10a bis Q.10d).

Die für die Reaktorregelung verwendeten Zustandsregler und Beobachter sind im Anhang R zusammengestellt.

Zustandsregelung des Dampferzeugers

Bei dem Entwurf des Zustandsreglers und Beobachters für die Dampferzeugerregelung wurden der Frischdampfdurchsatz und die Frischdampftemperatur als Regelgrößen betrachtet. Der Sollwert des Frischdampfdurchsatzes wird lastabhängig von der Blockleitebene vorgegeben, während die Frischdampftemperatur über den gesamten Arbeitsbereich konstant gehalten wird. Als Stellgrößen dienen der Heizmitteldurchsatz und die Speisewassertemperatur. Die dritte Stellmöglichkeit, der Speisewasserdurchsatz, wird neben der Heizmitteleintrittstemperatur und dem Frischdampfdruck als meßbare Störgröße betrachtet, so daß die Zufuhr des für die jeweilige Last erforderlichen Speisewassers gewährleistet wird. Die Simulationsuntersuchungen haben hier wiederum bestätigt, daß die Zustandsregelung im Falle der Zustandsgrößenmessung bzw. mit idealem Beobachter unempfindlich gegenüber der Parameteränderung ist (Bilder S.1a bis S.1d und S.2a bis S.2c im Anhang S). Wegen der Vielzahl der komplexen Systempole des Dampferzeugers, die sich zum Teil in der Nähe der Imaginärachse befinden, ist die Parameterempfindlichkeit der Zustandsregelung mit Beobachter sehr groß, so daß in keinem Teillastpunkt das Nominal-

verhalten, das Führungsverhalten bei 100 % Last, erzielt wurde (Bilder S.3a bis S.3d). Dagegen hat sich das Störverhalten unwesentlich verschlechtert (Bilder S.4a bis S.4c). Die Parameterempfindlichkeit konnte durch den Einsatz des Modellvergleichverfahrens weitgehend reduziert werden (Bild S.5 und Bild S.7). Außerdem nähern sich die Regelgrößen nach einem anfänglichen Fehler dem Nominalverhalten an. Durch die getrennte Optimierung der Führungs- und Störungsregelung verhält sich das Störverhalten etwas günstiger (Bilder S.6a bis S.6c und Bilder S.8a bis S.8c). Die für die Dampferzeugerregelung verwendeten Zustandsregler und Beobachter sind im Anhang T zusammengestellt.

Wird die robuste Zustandsregelung in die Leistungsregelung der gesamten Anlage integriert, wobei die sprungförmige Laständerung über die Blockleitebene vorgegeben wurde und die Störungen von benachbarten Komponenten berücksichtigt wurden, so erhält man das in den Bildern U.9a bis U.9c im Anhang U dargestellte Regelverhalten. Darin erkennt man deutlich, daß die Zustandsreglung mit dem Vergleichsmodell im gesamten Arbeitsbereich das Norminalverhalten annähernd erreicht. Mit einem konstanten Beobachter verschlechtert sich zwar das Regelverhalten, verhält sich jedoch weniger parameterunempfindlich als eine Zustandsregelung ohne Vergleichsmodell.
Es sit deutlich ersichtlich, daß bei der Regelung der elektrischen Leistung ein ganz deutlicher Vorteil im Regelverhalten der Zustandsregelung gegenüber dem konventionellen Regler festzustellen ist ( im ganzen Lastbereich).

Der Vergleich der bei Zustandsreglern erzielten Ergebnisse der Regelung der elektrischen Leistung mit jenen der konventionellen Regelung (vgl. Anhang P) zeigt, daß im gesamten Lastbereich eine ganz wesentliche Verbesserung durch Einsatz der Zustandsregelung erzielt wurde.

# 9. Zusammenfassung

Der Einsatz konventioneller Regler an einem realen technischen Prozeß liefert wegen der Komplexität der zu regelnden Regelstrecke oft unbefriedigende Ergebnisse.

In der vorliegenden Arbeit wurden am Beispiel des Kernkraftwerks "SNR 300" in Kalkar vereinfachte mathematische Modelle erstellt. Als Ausgangspunkt diente dabei ein mathematisch-physikalisches Simulationsmodell, das zur Beschreibung der Dynamik der Kraftwerkskomponente ein sehr komplexes, zum Teil nichtlineares Gleichungssystem enthält. Anhand dieses Simulationsmodells werden für verschiedene Arbeitspunkte deterministische Systemantworten berechnet, woraus mittels geeigneter Analyseverfahren lineare Übertragungsfunktionen ermittelt wurden. Anhand der Approximationsergebnisse wurden 2 verschiedene lineare mathematische Modelle erstellt. Das eine nutzt die vorhandene Rechnerkapazität aus, um das dynamische Verhalten der gesamten Kraftwerksanlage mit großer Genauigkeit zu beschreiben. Für das andere, das für den Regler- und Beobachterentwurf bestimmt ist, wurde eine weitere Modellvereinfachung vorgenommen, und es enthält nur solche Teilstrecken, die für den Regler- und Beobachterentwurf notwendig sind. Bei der Erstellung der vereinfachten mathematischen Modelle wurde neben der Modellgenauigkeit auch auf die gleiche Modellstruktur geachtet. Der Vergleich des dynamischen Verhaltens des mathematischen und mathematisch-physikalischen Modells im offenen und geschlossenen Regelkreis mit konventionellem Regelungskonzept zeigen, abgesehen von den von der Richtungsabhängigkeit des Prozesses hervorgerufenen Modellfehlern, sehr gute Übereinstimmungen.

Um gewissen Modellfehlern gegenüber dem realen Prozeß infolge der Linearisierung und Ordnungsreduktion einerseits und den lastabhängigen Parameteränderungen andererseits sinnvoll entgegenzuwirken, wurden parameterunempfindliche Zustandsregelungen mit Beobachter ohne Anpassung der Reglerparameter realisiert und durch Simulation erprobt. Dabei wurden die zusätzlichen Freiheitsgrade, die entwe-

der im Beobachter bereits vorhanden und frei vorgebbar sind oder durch eine Strukturerweiterung des Regelsystems entstehen, im Sinne der Parameterunempfindlichkeit beeinflußt. Die Simulationsuntersuchungen zeigen, daß durch eine geeignete Wahl der Beobachterpole eines vollständigen Beobachters eine parameterunempfindliche Zustandsregelung realisiert werden kann. Um darüber hinaus auch bei Parameteränderungen im Teillastbereich ein Nominalverhalten zu erreichen, wurde die Zustandsregelung um ein Vergleichsmodell erweitert. Die Strukturerweiterung ermöglicht die getrennte Optimierung für Führungs- und Störungsregelung, so daß im gesamten Arbeitsbereich das für 100 % Last, für die der Zustandsregler und Beobachter entworfen wurden, erzielte Regelverhalten nahezu erreicht und außerdem das Führungsverhalten verbessert werden konnte.

Literaturverzeichnis

Ackermann, J. (1972), Abtastregelung, Springer-Verlag.

Ackermann, J. (1976), Einführung in die Theorie der Beobachter, Regelungstechnik, Heft 7, S. 217-226.

Athans, M., Falb, P.L. (1966), Optimal Control, McGraw-Hill.

Bjørlo, R., Grumbach, R., Josefsson, R. (1970), Digital Control of the Halden Boiling Water Reactor by a Concept Based on Modern Control Theory, Nuclear Science and Engineering, 39, S. 231-240.

Böttiger, F. (1975), Einige Sonderformen des optimalen linearen Reglers für Mehrgrößenregelstrecken, Abteilung Prozeßrechner und Regelungstechnik/IVD, Universität Stuttgart, Interner Bericht Nr. 7531.

Bolch, G. (1973), Identifikation linearer Systeme durch Anwendung von Momentenmethoden, Dissertation Universität Karlsruhe.

Breinl, W. (1980), Entwurf eines parameterunempfindlichen Reglers am Beispiel der Magnetschwebebahn, Regelungstechnik, Heft 3, S. 87-92.

Breznai, G.T., Sinha, N.K. (1973), Adaptive Nuclear Control for Integral Quadratic Cost Functions, Automatica, 9, S.527-536.

Bruens, N.W.S., Brukx, J.F.L.M., Latzko, D.G.H., Vriesema, B. (1975), Modelling of Nuclear Steam Generator Dynamics, Proceedings of the Second Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium, Knoxville, Tennessee.

Brukx, J.F.L.M. (1974), CSDT Simulation Model for Prediction of LHT Transient Behaviour Using S/360 CSMP, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.

Caines, P.E., Mayne, D.Q. (1970), On the Discrete Time Matrix Riccati-Equation of Optimal Control, Int. J. Control, Vol. 12, Nr. 5, S. 785-794.

Caines, P.E., Mayne, D.Q. (1971), On the Discrete Time Matrix Riccati-Equation of Optimal Control - A Correction, Int. J. Control, Vol. 14, Nr. 1, S. 205-207.

Calovič, M.S. (1972), Power System Load and Frequency Control Using an Optimum Linear Regulator with Integral Feedback, 5th IFAC-Congress, Paris.

Dan Van Mien, H., Godin, P., Miossec, P. (1974), An Application of Multivariable Techniques to an Electrical Power Plant, IFAC-Symposium on Multivariable Technological Systems, Manchester.

Davison, E.J., Goldenberg, A. (1975), Robust Control of a Servomechanism Problem: The Servo Compensator, Automatica, S.461-471.

Dettinger, R. (1976), Entwurf einer optimalen Regelung für komplizierte Mehrgrößensysteme und Erprobung am Beispiel eines Dampferzeugers, Dissertation Universität Stuttgart.

Ertel, V. (1975), Technischer Bericht: CODY II, ein Rechenprogramm zur Dynamik natriumgekühlter Reaktoren, Interatom, Bensberg/Köln, ITB 75.82.

Vom Felde, M. (1979), Entwurf und Erprobung des optimalen Zustandsreglers für diskrete Systeme, Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung, Ruhr-Universität Bochum, Diplomarbeit ESR-7902.

Föllinger, O. (1974), Lineare Abtastsysteme, R. Oldenbourg Verlag München Wien.

Frank, P.M. (1976), Empfindlichkeitsanalyse dynamischer Systeme, R. Oldenbourg Verlag München, Wien.

Frank, P.M., Münzer, W.(1978), Entwurfsverfahren für parameterunempfindliche Abtastregelungen, Regelungstechnik 26, S. 213-248

Grübel, G. (1977), Beobachter zur Regelsynthese, Habilitation, Ruhr-Universität Bochum.

Gunby, A.L. (1970), Intermediate Heat Exchanger Modeling for FFTF Simulation, Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratories, Richland, Washington.

Harris, E.L. (1974), Feedback Control for Steam Boiler Turboalternator Systems: An Application of Discrete Optimal Control with Constraints, IFAC-Symposium on Multivariable Technological Systems, Manchester.

Heemskerk, F. (1980), Regelung und Lastfolgeverhalten des schnellen natriumgekühlten Reaktors SNR-300 (KKW-Kalkar). Atomkernenergie Kerntechnik Bd. 35, S.283-286.

Herbrik, R., Jamshidi, M. (1972), Design of an Optimum State Regulator for an Once-Through Boiler, 5th IFAC-Congress, Paris.

Hewer, G.A. (1971), An Iterative Technique for the Computation of the Steady State Gains of the Discrete Optimal Regulator, IEEE Ztsnd. Automatic Control, Vol. AC-16, Nr. 4, S.382-383.

Himmel, Th. (1971), Technischer Bericht: Das Simulationsmodell DYPAS des SNR und seines Primärkreissystems einschließlich der Zwischenwärmetauscher, Interatom, Bensberg/Köln, ITB 71 34.

Hudzovic, P. (1969), Die Identifikation von aperiodischen Systemen, Automatizace XII, S.289-293.

Irving, E., Dang Van Mien, H. (1981), Discrete-Time Model Reference Multivariable Adaptive Control, Application to Electric Power Plant, 8th IFAC-Congress, Kyoto, S.XX227-XX241.

Joyner, L.L., Mishra, B.B. (1974), Digital Control for a Competitive Nuclear Powered Mechant Ship, IFAC-Symposium on Multivariable Technological Systems, Manchester.

Juen, G. (1979), Führungs- und Störgrößenregelung eines Dampferzeugers unter Einsatz von Beobachtern, Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung, Ruhr-Universität Bochum, Diplomarbeit ESR-7925.

Kreindler, E. (1968), Closed-Loop Sensitivity Reduction of Linear Optimal Control Systems, IEEE Trans. Automat. Control, Vol. AC-13, Nr. 3, S. 254-262.

Krebs, V. (1973), Das Gleichgewichtstheorem - eine grundsätzliche Aussage über das Verhalten von Regelkreisen, Regelungstechnik 21, S. 25-27 u. S. 56-59.

Kreisselmeier, G., Grübel, G. (1972), The Design of Optimally Parameter Insensitive Control Systems, IFAC-Congress, Paris.

Kremer, H., Lacroix, A. (1972), Praktische Berechnung von Exponentialapproximationen mit dem Prony-Verfahren, Angewandte Informatik, S.121-126.

Kwakernaak, H., Sivan, R. (1972), Linear Optimal Control Systems, Wiley-Interscience.

Lacroix, A. (1973), Systemidentifikation mit dem Prony-Verfahren, Regelungstechnik und Prozeß-Datenverarbeitung, Heft 5, S.150-157.

Luenberger, D.G. (1971), An Introduction to Observers, IEEE Trans. Automat. Control, Vol. AC-16, Nr. 6, S. 596-602.

MacFarlane, A.G.J. (1970), The return difference and return ratio matrices anf their use in analysis and design of multivariable feedback control systems. Proc. IEE, 117, S. 2037-2049.

Merz, L. (1961), Regelung und Instrumentierung von Kernreaktoren, I. Band: Grundbegriffe und Grundlagen, R. Oldenbourg-Verlag, München.

Moncman, E. et. al. (1972), Approximation von Übertragungsfunktionen mit Hilfe des Digitalrechners, Regelungstechnik und Prozeß-Datenverarbeitung, Heft 6, S. 261-267.

Moore, R.L., Schweppe, F. (1972), Adaptive Control for Nuclear Plant Load Changes, 5th IFAC-Congress, Paris, Paper 6.3

Moore, J.B., Ledwich, G.F. (1975), Minimal Order Observers for Estimating Linear Functions of a State Vector, IEEE Trans. Automat. Control, Vol. AC-20, Nr. 5, S. 623-631.

Müller, P.C., Lückel, J. (1977), Zur Theorie der Störgrößenaufschaltung in linearen Mehrgrößensystemen, Regelungstechnik, S. 54-59.

Perkins, W.R., Cruz, J.B. (1971), Feedback Properties of Linear Regulators, IEEE Trans. Automat. Control, Vol. AC-16, Nr. 6, S. 659-663.

Profos, P. (1962), Die Regelung von Dampfanlagen, Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg.

Roman, J.R., Bullock, T.E. (1975), Design of Minimal Order Stable Observers for Linear Functions of the State via Realization Theory, IEEE Trans. Automat. Control, Vol. AC-20, Nr. 5, S. 613-622.

Schmid, Chr. (1974), Zustandsrekonstruktion linearer deterministischer Systeme durch Beobachter, Abteilung Prozeßrechner und Regelungstechnik/IVD, Universität Stuttgart, Interner Bericht Nr. 7436.

Schmid, Chr., Unbehauen, H. (1979), KEDDC - A General Purpose CAD Software System for Application in Control Engineering, IFAC/IFIP 2nd Symposium on Software for Computer Control, Prague.

Smidt, D. (1975), Reaktortechnik, Band 1 und 2: Grundlagen, G. Braun, Kralsruhe.

Schönfeld, E. (1969), Vergleichende dynamische Untersuchungen an einem natriumbeheizten Zwangsdurchlauf-Dampferzeuger für moderne Kernkraftwerke, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK 9-5.

Schultz, D.G., Melsa, J.L. (1967), State Functions and Linear Control Systems, McGraw-Hill.

Strejc, V. (1959), Approximation aperiodischer Übertragungscharakteristiken, Regelungstechnik, S. 124-128.

Sten, J.W. (1970), Evaluation Second-Order Parameters, Instrumentation Technology, Heft 9, S. 39-41.

Tou, T.J. (1964), Modern Control Theory, McGraw-Hill.

Tye, G. (1980), On-Line Computer Control of a Nuclear Reactor Using Optinal Control and State Estimation Methods, 6th IFAC/IFIP Conference, Düsseldorf.

Unbehauen, H. (1981), Vorlesung Regelungstechnik III. Gedrucktes Manuskript. Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung, Ruhr-Universität Bochum.

Unbehauen, H., Jun, K., Woelker, A. (1981), A Novel Power Control Design for a Fast Breeder Nuclear Reactor, IFAC VIII Triennial World Congress, Kyoto.

Vaughan, D.R. (1970), A Nonrecursive Algebraic Solution for the Discrete Riccati-Equation, IEEE Trans. Automat. Control, Vol.Ac-15, S. 597-599.

Watzel, G.V.P., Rasche, G.H. (1973), Das Kernkraftwerk Kalkar, Brennstoff-Wärme-Kraft, Bd. 25, Nr. 7, S. 257-301.

Weihrich, G. (1973), Optimale Regelung linearer deterministischer Prozesse, R. Oldenbourg Verlag München Wien.

Weihrich, G. (1977), Mehrgrößen-Zustandsregelung unter Einwirkung von Stör- und Führungssignalen, Regelungstechnik, S. 166-172, 204-209.

Woelker, A. (1980), Entwurf und Erprobung einer gesteuerten Adaption des Zustandsreglers mit Beobachter für die Reaktor-Leistungsregelung eines Kernkraftwerkes, Ruhr-Universität Bochum, Diplomarbeit ESR-8007.

Yamada, H., Holik, A. (1977), Technischer Bericht: Digitales Simulationsmodell des IDWR-Dampferzeugers für betriebsdynamische Probleme, Interatom, Bergisch Gladbach (Bensberg), ITB 77.24.

Superiority of Transfer Function over State-Variable Methods in Linear Time-Invariant Feedback System Design, IEEE Trans. Automat. Control, Vol. AC-20, S. 84-95.

## Zusammenstellung der wichtigsten Formelzeichen

| | | |
|---|---|---|
| $a$ | - | Zählerkoeffizient der Übertragungsfunktion |
| $A$ | $m^2$ | Querschnittfläche, Strömungsquerschnitt |
| $\underline{A}$ | - | Systemmatrix |
| $\underline{A}_k$ | - | Systemmatrix des kontinuierlichen Zustandsraum-modells |
| $b$ | - | Nennerkoeffizient der Übertragungsfunktion |
| $\underline{B}$ | - | Steuermatrix |
| $\underline{B}_k$ | - | Steuermatrix des kontinuierlichen Zustandsraum-modells |
| $\underline{B}_Z$ | - | Störmatrix |
| $c$ | $\frac{Ws}{kg \cdot K}$ | spezifische Wärme |
| $C$ | - | Bewertungsfaktor |
| $\underline{C}$ | - | Ausgangsmatrix |
| $C_i$ | - | Konzentration der Mutterkerne für die i-te Gruppe verzögerter Neutronen |
| $C_k$ | - | Ausgangsmatrix des kontinuierlichen Zustandsraum-modells |
| $d$ | m | Druckmesser des Rohrs |
| $D$ | $\frac{m^2}{Ks}$ | Diffusionszeitkonstante |
| $\underline{D}$ | - | Beobachtermatrix |
| $e$ | $\frac{Ws}{kg}$ | innere Energie pro Masseneinheit |
| $\underline{e}$ | - | Vektor der Reglerabweichung |
| $\underline{E}$ | - | Beobachterankopplungsmatrix |
| $\underline{F}$ | - | Steuermatrix |
| $F_B(s)$ | - | Beobachtereinflußfaktor |
| $G$ | $\frac{kg}{s\ m^2}$ | Massendurchsatz pro Flächeneinheit |
| $G(s)$ | - | Übertragungsfunktion |
| $\underline{G}$ | - | Beobachtersteuermatrix |
| $\underline{G}_Z$ | - | Beobachterstörmatrix |
| $H$ | m | Pumpenförderhöhe |
| $h$ | $\frac{Ws}{kg}$ | Enthalpie |

| | | |
|---|---|---|
| $h_{E/A}$ | $\frac{Ws}{kg}$ | Enthalpiegefälle der Turbine |
| $h_G$ | $\frac{Ws}{kg}$ | durchflußgemittelte Enthalpie |
| $H_R$ | m | Strömungswiderstandshöhe |
| $h_{Tu}$ | - | Ventilstellung der Turbine |
| $h_V$ | $\frac{Ws}{kg}$ | volumengemittelte Enthalpie |
| $H_N$ | - | Meßstörübertragungsfunktion |
| $H_Z(s)$ | - | Störübertragungsfunktion |
| I | - | Gütefunktional |
| $\underline{I}$ | - | Einheitsmatrix |
| k | - | Koeffizient bzw. Wichtungsfaktor |
| K | - | Verstärkungsfaktor |
| $\underline{K}$ | - | Lösungsmatrix der Matrix-Riccati-Gleichung |
| L | $\frac{W}{m^3}$ | Leistungsdichte |
| m | $\frac{kg}{s}$ | Durchsatz |
| $\underline{M}$ | - | Kreuzbewertungsmatrix |
| $\underline{M}^*$ | - | Transformationsmatrix |
| $M_{FD}$ | kg | gespeicherte Frischdampfmenge |
| N | | Nullstelle der Übertragungsfunktion |
| $n_B$ | - | Anzahl der Radialzonen des repräsentativen Brennstabs |
| $N_{el}$ | W | elektrische Leistung |
| $N_{elS}$ | W | elektrischer Leistungssollwert |
| $N_L$ | W | thermische Reaktorleistung |
| $N_{Nachz}$ | W | Nachzerfallsleistung |
| $n_{OPL}$ | - | Anzahl der Diffusionsteilstrecken |
| $n_p$ | - | Anzahl der Pole |
| $n_{St}$ | - | Anzahl der repräsentativen Brennstäbe |
| p | bar | Druck |
| P | - | Pol der Übertragungsfunktion |
| $p_a$ | bar | Druck im oberen Plenum |
| $P_B$ | - | charakteristisches Polynom des Beobachters |
| $P_c$, $P_{cx}$ | - | charakteristisches Polynom des geschlossenen Systems |

| | | |
|---|---|---|
| $p_e$ | bar | Druck im unteren Plenum |
| $p_{NK}$ | bar | Naturumlaufdruck im Kernkanal |
| $p_{NP}$ | bar | Naturumlaufdruck im Primärkreis |
| $P_o$ | - | charakteristisches Polynom des offenen Systems |
| $p_{PP}$ | bar | Förderdruck der Primärpumpe |
| $p_{RK}$ | bar | Reibungsdruckverlust im Kernkanal |
| $p_{RP}$ | bar | Reibungsdruckverlust im Primärkreis (ohne Kern) |
| $q$ | $\frac{W}{m^2}$ | Wärmestromdichte |
| $\underline{q}$ | - | Beobachterzustandsvektor |
| $\underline{Q}$ | - | Bewertungsmatrix |
| $\underline{Q}^*$ | - | Beobachtermatrix |
| $r$ | m | Radius |
| $R$ | $\frac{Ws}{kgK}$ | Gaskonstante |
| $\underline{R}$ | - | Bewertungsmatrix |
| $\underline{R}^*$ | - | Beobachtermatrix |
| $R(s)$ | - | dynamischer Regelfaktor |
| $\mathcal{R}$ | $\frac{mkg}{s^2}$ | Reibungswiderstand pro Volumeneinheit |
| $R_{Na/R}$ | $\frac{K}{W}$ | Wärmeleitwiderstand Natrium-Rohr |
| $R_{R/f}$ | $\frac{K}{W}$ | Wärmeleitwiderstand Rohr-Wasser (Dampf) |
| $\underline{S}$ | - | Bewertungsmatrix |
| $S(s)$ | - | Bodesche Empfindlichkeitsfunktion |
| $t$ | s | Zeit |
| $\underline{T}$ | - | Transformationsmatrix |
| $t_L$ | s | mittlere Lebensdauer der Neutronen |
| $\underline{u}$ | - | Steuervketor |
| $\underline{v}$ | - | Steuervektor |
| $V$ | $m^3$ | Volumenelement |
| $w, \mathfrak{w}$ | $\frac{m}{s}$ | Strömungsgeschindigkeit |
| $\underline{w}$ | - | Vektor der Führungsgröße |
| $w_z$ | $\frac{m}{s}$ | z-Komponente des Geschwindigkeitsvektors $\mathfrak{w}$ |
| $\underline{x}$ | - | Zustandsvektor |
| $x^*$ | - | Dampfgehalt |

| | | |
|---|---|---|
| $x_{promt}$ | - | Leistungsanteil prompter Neutronen |
| $\underline{y}$ | - | Ausgangsvektor |
| z | - | Applikote der Zylinderkoordinate |
| $\underline{z}$ | - | Störvektor |
| $\Delta z$ | m | Höhe einer Axialzone des repräsentativen Brennstabs |
| $\alpha$ | $\frac{W}{m^2K}$ | Wärmeübergangszahl |
| $\beta$ | - | Anteil der beim Spaltprozeß verzögert entstehenden Neutronen |
| $\beta_i$ | - | Anteil der i-ten Gruppe verzögerter Neutronen |
| $\zeta$ | - | Widerstandsbeiwert |
| $\eta$ | - | Wirkungsgrad |
| $\vartheta$ | K | Temperatur |
| $\vartheta_A$ | K | mittlere BE-Austrittstemperatur |
| $\vartheta^*_{K_E}$ | K | verzögerte Kerneintrittstemperatur |
| $\kappa$ | $\frac{N}{m^3}$ | äußere Kraft pro Volumeneinheit |
| $\lambda$ | $\frac{W}{mK}$ | Wärmeleitfähigkeit |
| $\lambda_i$ | s | Zerfallszeitkonstante der Mutterkerne für i-te Gruppe verzögerter Neutronen |
| $\mu$ | $\frac{m^3}{kg}$ | spezifisches Volumen |
| $\rho$ | - | Reaktivität |
| $\rho^*$ | $\frac{m^3}{kg}$ | Dichte |
| $\rho_R$ | - | Regelstabreaktivität |
| $\rho_{th}$ | - | thermische Reaktivitätsrückwirkung |
| $\tau_D$ | s | Diffusionszeit |
| $\tau_T$ | s | Transportzeit |
| $\varphi$ | - | Winkel der Zylinderkoordinate |
| $\phi$ | $\frac{Ws}{m^3}$ | Energieströmung pro Volumeneinheit |
| $\Phi_N$ | - | Neutronenfluß |
| $\omega$ | $\frac{1}{s}$ | Winkelgeschwindigkeit |

Indices und sonstige Abkürzungen:

| | |
|---|---|
| a | Rohr außen |
| AUS | Austritt |
| B | Brennstoff |
| BE | Brennelement |
| B/H | Brennstoff→Hüllrohr |
| DE | Dampferzeuger |
| EIN | EIntritt |
| f | Wasser bzw. Dampf |
| FD | Frischdampf |
| H | Hüllrohr |
| H/K | Hüllrohr→Kühlmittel |
| i | Rohr innen |
| K | Kühlmittel |
| KA | Kernaustritt |
| KB | Kernbypas |
| KE | Kerneintritt |
| KK | Kernkanal |
| K/S | Kühlmittel→Struktur |
| Na | Natrium |
| Na/R | Natrium→Rohr |
| OPL | oberes Plenum |
| Pr | Primärkreis |
| R | Rohr |
| RA | Reaktoraustritt |
| RE | Reaktoreintritt |
| R/f | Rohr→Wasser(Dampf) |
| R/S | Rohr→Schmutzschicht |
| S | Struktur |
| Sek | Sekundärströmung, Sekundärkreis |
| Sp | Speisewasser |
| SS | Struktur des BE-Kastens |
| Tu | Turbine |
| ÜH | Überhitzer |
| VD | Verdampfer |
| ZWT | Zwischenwärmetauscher |
| O | Nennzustand |
| ∞ | stationärer Zustand |

Anhang A: Thermische Reaktivitätseffekte
Anhang B: Differentialgleichungen zur Beschreibung der Dampferzeugerdynamik
Anhang C: Übergangsfunktionen des Reaktors
Anhang D: Übergangsfunktionen des Dampferzeugers
Anhang E: Übergangsfunktionen des Zwischenwärmetauschers
Anhang F: Übergangsfunktionen der Rohrleitung zwischen dem Dampferzeuger und Turbogenerator
Anhang G: Approximationsergebnisse des Reaktors
Anhang H: Approximationsergebnisse des Dampferzeugers
Anhang I: Approximationsergebnisse des Zwischenwärmetauschers
Anhang J: Verlauf der Pole und des Verstärkungsfaktors in Abhängigkeit vom Lastzustand
Anhang K: Bewertungsfaktoren $C_E$, $C_A$, $C_F$ und C
Anhang L: Analogrechenschaltbild des Reaktormodells
Anhang M: Analogrechenschaltbild des Dampferzeugermodells
Anhang N: Analogrechenschaltbild des Zwischenwärmetauschers
Anhang O: Zustandsraummodelle des Reaktors und Dampferzeugers
Anhang P: Vergleich der mathematischen und mathematisch-physikalischen Modelle im geschlossenen Regelkreis mit konventionellem Regelungskonzept
Anhang O: Regelverhalten des Reaktors mit Zustandsregelung
Anhang R: Zustandsregler und Beobachter für Reaktorregelung
Anhang S: Regelverhalten des Dampferzeugers mit Zustandsregelung
Anhang T: Zustandsregler und Beobachter für Dampferzeugerregelung
Anhang U: Regelverhalten der gesamten Anlage

## Anhang A: Thermische Reaktivitätseffekte

### 1. Dopplereffekt

Durch eine Temperaturänderung in schweren Atomkernen entsteht zwischen dem einfallenden Neutron und dem getroffenen Kern ein Energieunterschied, der infolge der resonanzartigen Wechselwirkung eine große Änderung der Einfangsrate der Neutronen bewirken. Die Temperaturerhöhungen der Atomkerne führen bei schnellen Kernen zu einer erhöhten Absorption von Neutronen und damit zu Neutronenverlusten. Umgekehrt führen Temperaturerniedrigungen zu einer geringeren Absorption.

Zur Beschreibung des Dopplereffektes dient der Ansatz

$$\frac{\partial K}{\partial \vartheta_B} = \frac{1}{\vartheta_B}\left(a_D + \frac{b_D}{\sqrt{\vartheta_B}}\right)$$

mit

| | |
|---|---|
| $K$ | Vermehrungsfaktor der Neutronen |
| $\vartheta_B$ | Brennstofftemperatur |
| $a_D$, $b_D$ | für jede Axialzone vorgegebene Konstanten. |

### 2. Kühlmittel- und Stahldichteeffekt

Durch thermische Expansion - Dichteänderung und Ausdehnung - vom Kühlmittel, Hüllrohr und Strukturmaterial wird eine Reaktivitätsänderung hervorgerufen:

$$\frac{\partial K}{\partial \vartheta_H} = \alpha_H$$ Temperaturkoeffizient des Hüllrohrs

$$\frac{\partial K}{\partial \vartheta_K} = \alpha_K$$ Temperaturkoeffizient des Kühlmittels

$\frac{\partial K}{\partial \vartheta_S} = \alpha_S$ Temperaturkoeffizient der Struktur

3. Reaktivitätseffekt durch axiale Brennstoffausdehnung

Die Temperaturänderung $\vartheta_{BA}$ der Brennstoffoberfläche verursacht infolge der Dichte- und Längenänderung eine Reaktivitätsänderung:

$$\frac{\partial K}{\partial H} = \alpha_{ax}$$

$$\frac{\partial K}{\partial \rho_B^*/\rho_B^*} = \alpha_B$$

mit

$$\Delta H = H \alpha \Delta \vartheta_{BA}$$

$$\Delta \rho_B^*/\rho_B^* \approx -\alpha \Delta \vartheta_{BA}$$

$\alpha_{ax}$ Reaktivitätskoeffizient für axiale Ausdehnung bei konstanter Dichte $\rho_B^*$

$\alpha_B$ Reaktivitätskoeffizient für Brennstoffdichte bei konstanter Höhe H

$\alpha$ Ausdehnungskoeffizient des Brennstoffes

4. Bowingeffekt

Die durch radiale Leistungsverteilung im Kern verursachten, unterschiedlichen Kanalaufwärmspannen bewirken eine ungleiche thermische Ausdehnung der Seitenfläche der Brennelementenkästen. Die damit verbundene Verbiegung des Brennelementenkastens führt zu einer Reaktivitätsänderung, die näherungsweise aus der Kernaufwärmspanne $\Delta \vartheta_{core}$ berechnet wird:

$$\rho_{Bow} = \rho_{Bow,0} \frac{\Delta\vartheta_{core}}{\Delta\vartheta_{core,0}}$$

Die gesamte Reaktivitätsänderung, die durch Temperaturänderung im Reaktorkern hervorgerufen wird, ergibt sich aus einzelnen Temperatureffekten zu:

$$\frac{d\rho_{th}}{dt} = \sum_{i,j,k} \left[ \frac{1}{\vartheta_{B_i}} \left( a_{D_i} + \frac{b_{D_i}}{\sqrt{\vartheta_{B_i}}} \right) \frac{d\vartheta_{B_i}}{dt} + \right.$$

$$\left. + \alpha_{H_j} \frac{dH_j}{dt} + \alpha_{K_j} \frac{d\vartheta_{K_j}}{dt} + \alpha_S \frac{d\vartheta_{S_j}}{dt} + \alpha_{ax} \frac{dH_K}{dt} - \alpha_{B_j} \frac{dH_j}{H_j dt} \right] + \frac{d\rho_{Bow}}{dt}$$

Anhang B: Differentialgleichungen zur Beschreibung der Dampferzeugerdynamik

ⓐ Vorwärmzone ($i=1$, $z_1=0$, $\frac{d}{dt}z_1=0$)

1) Massenbilanz

Arbeitsmittel (Wasser):

$$G(z_1) - G(z_2) = z_{2\frac{d}{dt}}\rho_1^* + [\rho_1^*-\rho^*(z_2)]\frac{d}{dt}z_2 \tag{B.1}$$

Heizmittel (Natrium):

$$G_{Na}(z_1)-G_{Na}(z_2) = \frac{1}{2}[\rho_{Na}^{*(1)}-\rho_{Na}^*(z_2)]\frac{d}{dt}z_2 \tag{B.2}$$

2) Energiebilanz

Arbeitsmittel (Wasser):

$$\frac{\vartheta_R(1)-\vartheta_f(1)}{R_{R/f}^{(1)}} = A\{\rho_1^* z_{2\frac{d}{dt}}h_V^{(1)} + G(z_2)h_G(z_2) - G(z_1)h_G(z_1)$$

$$-[\rho^*(z_2)h_V(z_2)-\rho_1^* h_V^{(1)}]\frac{d}{dt}z_2 + h_V^{(1)} z_{2\frac{d}{dt}}\rho_1^*\} \tag{B.3}$$

Rohrwand:

$$\frac{\vartheta_{Na}^{(1)} - \vartheta_R^{(1)}}{R_{Na/R}^{(1)}} - \frac{\vartheta_R^{(1)} - \vartheta_f^{(1)}}{R_{R/f}^{(1)}} = c_R\rho_R^*\pi[(r_a)^2 - (r_i)^2][z_{2\frac{d}{dt}}\vartheta_R^{(1)}$$

$$-\vartheta_R(z_2)]\frac{d}{dt}z_2 \tag{B.4}$$

Heizmittel (Natrium):

$$\frac{\vartheta_{Na}^{(1)} - \vartheta_{R}^{(1)}}{R_{Na/R}^{(1)}} = -[A_{Na}\rho_{Na}^{*(1)} c_{Na} + A_R\rho_R^* c_R] z_2 \frac{d}{2dt} \vartheta_{Na}^{(1)}$$

$$+ A_{Na} c_{Na} [G_{Na}(z_2)\vartheta_{Na}(z_2) - G_{Na}(z_1)\vartheta_{Na}(z_1)]$$

$$+\{A_{Na}\rho_{Na}^{*}(z_2) c_{Na} \vartheta_{Na}(z_2)$$

$$-[A_{Na}\rho_{Na}^{*(1)} c_{Na} + A_R\rho_R^* c_R]\ \vartheta_{Na}^{(1)}\}\frac{d}{dt} z_2 \qquad (B.5)$$

3) Impulsbilanz

Arbeitsmittel (Wasser):

Druckabfall gering ($p_2 - p_1 < 0.1$ bar)

ⓑ Verdampferzone (i=2,3)

1) Massenbilanz

Arbeitsmittel (Wasser/Dampf):

$$G(z_i) - G(z_{i+1}) = [z_{i+1}-z_i]\frac{d}{dt}\rho_i^* + [\rho_i^*-\rho^*(z_{i+1})]\frac{d}{dt}z_{i+1} + [\rho^*(z_i) - \rho_i^*]\frac{d}{dt}z_i \qquad (B.6)$$

Heizmittel (Natrium):

$$G_{Na}(z_i) - G_{Na}(z_{i+1}) = \frac{1}{2}[\rho_{Na}^*(z_i)-\rho_{Na}^*(z_{i+1})]\frac{d}{dt}z_{i+1} + \frac{1}{2}[\rho_{Na}^*(z_i)-\rho_{Na}^*(z_{i+1})]\frac{d}{dt}z_i \qquad (B.7)$$

2) Energiebilanz

Arbeitsmittel (Wasser/Dampf):

$$\frac{\vartheta_R^{(i)} - \vartheta_f^{(i)}}{R_{R/f}^{(i)}} = A\{\rho_i^*[z_{i+1}-z_i]\frac{d}{dt}h_V^{(i)} + G(z_{i+1})h_G(z_{i+1}) - G(z_i)h_G(z_i) - [\rho^*(z_{i+1})h_V(z_{i+1})-\rho_i^*h_V^{(i)}]\frac{d}{dt}z_{i+1} + [\rho^*(z_i)h_V(z_i)-\rho_i^*h_V^{(i)}]\frac{d}{dt}z_i + h_V^{(i)}[z_{i+1}-z_i]\frac{d}{dt}\rho_i^*\} \qquad (B.8)$$

Rohrwand:

$$\frac{\vartheta_{Na}^{(i)} - \vartheta_R^{(i)}}{R_{N_a/R}^{(i)}} - \frac{\vartheta_R^{(i)} - \vartheta_f^{(i)}}{R_{R/f}^{(i)}} = c_R\rho_R^*\pi[(r_a)^2-(r_i)^2]\{[z_{i+1}-z_i]\frac{d}{dt}\vartheta_R^{(i)} - \vartheta_R(z_{i+1})\frac{d}{dt}z_{i+1} + [\vartheta_R(z_i)\frac{d}{dt}z_i \qquad (B.9)$$

Heizmittel (Natrium):

$$\frac{\vartheta_{Na}^{(i)} - \vartheta_{R}^{(i)}}{R_{Na/R}^{(i)}} = -\left[A_{Na}\rho_{Na}^{*(i)} c_{Na} + A_R\rho_R^* c_R\right]\left[z_{i+1} - z_i\right]\frac{d}{dt}\vartheta_{Na}^{(i)}$$

$$+ \left\{A_{Na}\rho_{Na}^{*}(z_{i+1}) c_{Na}\vartheta_{Na}(z_{i+1})\right.$$

$$\left. - \left[A_{Na}\rho_{Na}^{*(i)} c_{Na} + A_R\rho_R^* c_R\right]\vartheta_{Na}^{(i)}\right\}\frac{d}{dt}z_{i+1}$$

$$+ \left\{\left[A_{Na}\rho_{Na}^{*(i)} c_{Na} + A_R\rho_R^* c_R\right]\vartheta_{Na}^{(i)}\right.$$

$$\left. - A_{Na}\rho_{Na}^{*}(z_i) c_{Na}\vartheta_{Na}(z_i)\right\}\frac{d}{dt}z_i$$

$$+ A_{Na} c_{Na}\left[G_{Na}(z_{i+1})\vartheta_{Na}(z_{i+1}) - G_{Na}(z_i)\vartheta_{Na}(z_i)\right] \qquad (B.10)$$

3) Impulsbilanz

Arbeitsmittel (Wasser/Dampf):

Druckabfall gering ($p_4 - p_2 < 1$ bar)

(c) Überhitzerzone (i=4, $z_5$=const, $\frac{d}{dt}z_5=0$)

1) Massenbilanz
Arbeitsmittel (Dampf):

$$G(z_4) - G(z_5) = [z_5-z_4]\frac{d}{dt}\rho_4^* - [\rho^*(z_4)-\rho_4^*]\frac{d}{dt}z_4 \qquad (B.11)$$

Heizmittel (Natrium):

$$G_{Na}(z_4) - G_{Na}(z_5) = \frac{1}{2}[\rho_{Na}^*(z_4)- \rho_{Na}^*(z_5)]\frac{d}{dt}z_4 \qquad (B.12)$$

2) Energiebilanz
Arbeitsmittel (Dampf):

$$\frac{\vartheta_R^{(4)} - \vartheta_f^{(4)}}{R_{R/f}^{(4)}} = A\{\rho_4^*[z_5-z_4]\frac{d}{dt}h_V^{(4)} + G(z_5)h_G(z_5)-G(z_4)h_G(z_4)$$

$$+[\rho^*(z_4)h_V(z_4)-\rho_4^*h_V^{(4)}]\frac{d}{dt}z_4+h_V^{(4)}[z_5-z_4]\frac{d}{dt}\rho_4^* \qquad (B.13)$$

Rohrwand:

$$\frac{\vartheta_{Na}^{(4)}-\vartheta_R^{(4)}}{R_{Na/R}^{(4)}} - \frac{\vartheta_R^{(4)}-\vartheta_f^{(4)}}{R_{R/f}^{(4)}} = c_R\rho_R^*\pi[(r_a)^2-(r_i)^2]\{[z_5-z_4]\frac{d}{dt}\vartheta_R^{(4)}$$

$$+ \vartheta_R(z_4)\frac{d}{dt}z_4 \qquad (B.14)$$

Heizmittel (Natrium):

$$\frac{\vartheta_{Na}^{(4)}-\vartheta_{R}^{(4)}}{R_{Na/R}^{(4)}} = -\left[A_{Na}\rho_{Na}^{*(4)}c_{Na}+A_{R}\rho_{R}^{*}c_{R}\right]\left[z_5-z_4\right]\frac{d}{dt}\vartheta_{Na}^{(4)}$$
$$+A_{Na}c_{Na}\left[G_{Na}(z_5)\vartheta_{Na}(z_5)-G_{Na}(z_4)\vartheta_{Na}(z_4)\right]$$
$$+\left\{\left(A_{Na}\rho_{Na}^{*(4)}c_{Na}+A_{R}\rho_{R}^{*}c_{R}\right)\vartheta_{Na}^{(4)}\right.$$
$$\left.+A_{Na}\rho_{Na}^{*}(z_4)c_{Na}\vartheta_{Na}(z_4)\right\}\frac{d}{dt}z_4 \qquad (B.15)$$

3) Impulsbilanz

Arbeitsmittel (Dampf):

$$p_5-p_4 = \left[z_5-z_4\right]\frac{d}{dt}G_4 - \frac{\zeta}{2D}\left(G(z_4)\right)^2\mu_4\left[z_5-z_4\right] \qquad (B.16)$$

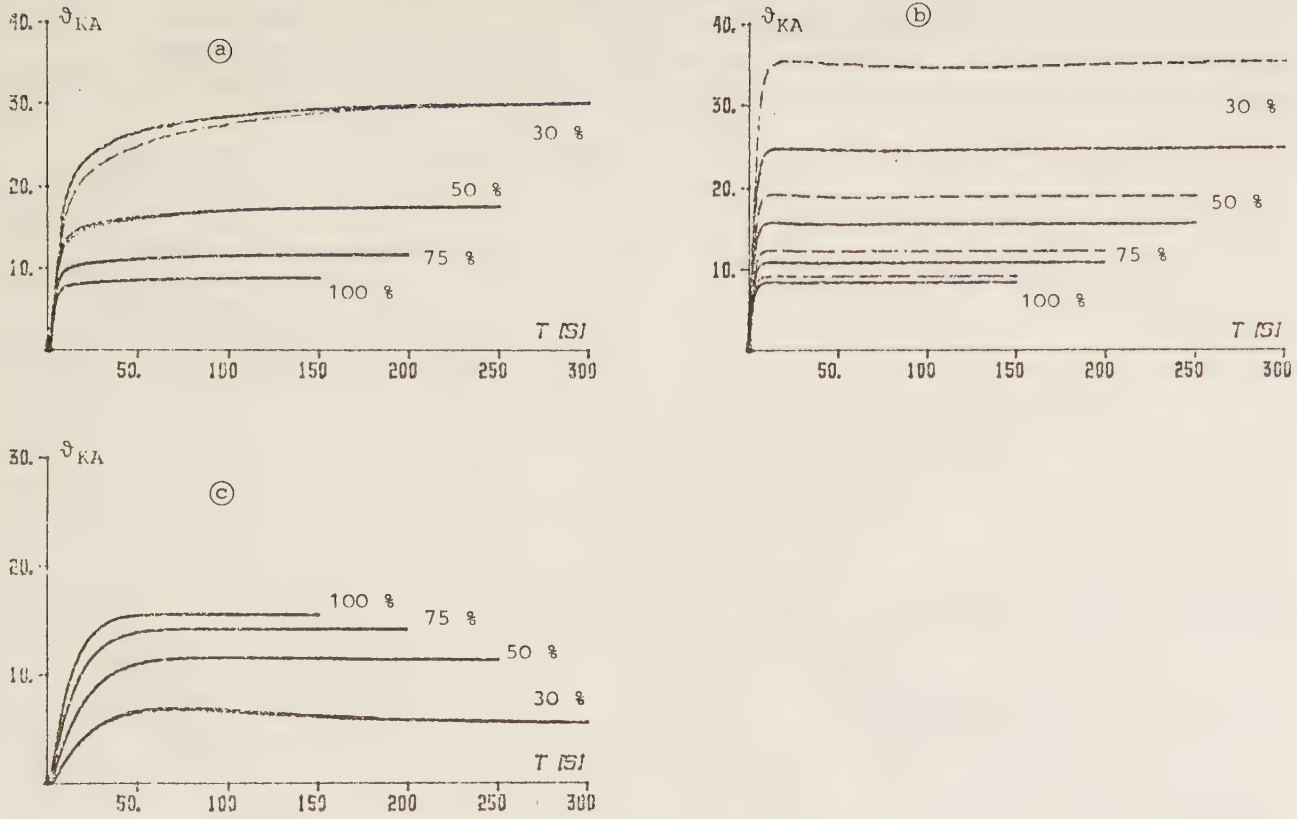
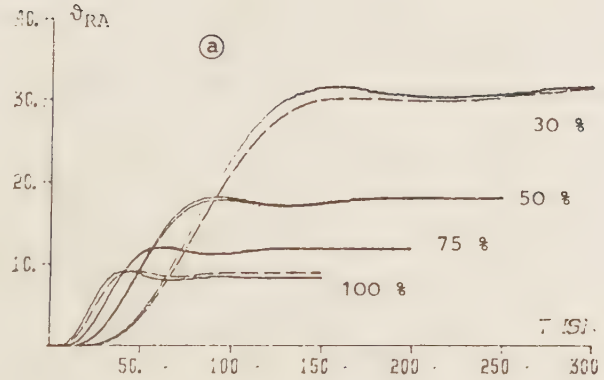
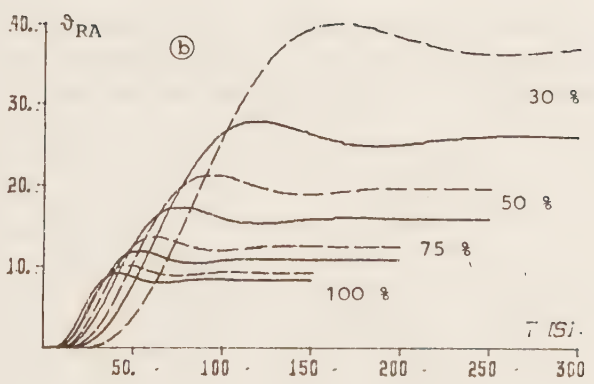



Bild C.1. Verlauf der Kernaustrittstemperatur $\vartheta_{KA}$ bei sprungförmiger Änderung ⓐ der Reaktivität ⓑ des Kühlmitteldurchsatzes und ⓒ der Kühlmitteleintrittstemperatur für verschiedene Lastzustände (30 %, 50 %, 75 %, 100 %) sowie deren Richtungsabhängigkeit von positiven (———) und negativen (- - -) Anregungen



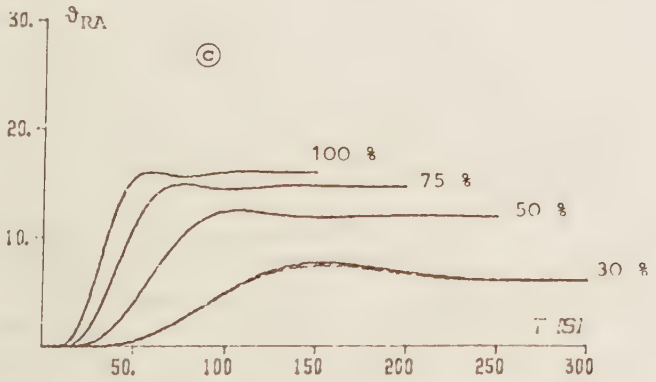
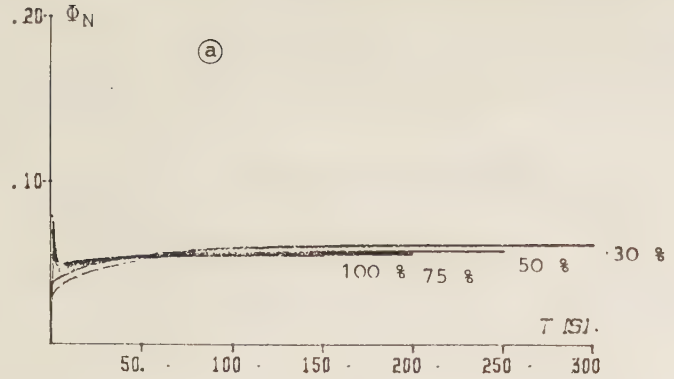
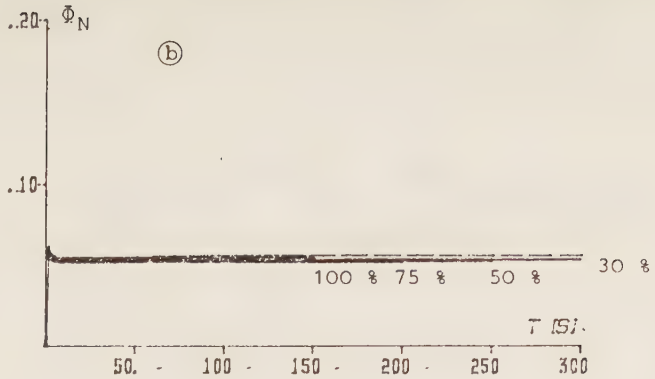




Bild C.2. Verlauf der Reaktoraustrittstemperatur $\vartheta_{RA}$ bei sprungförmiger Änderung ⓐ der Reaktivität ⓑ des Kühlmitteldurchsatzes und ⓒ der Kühlmitteleintrittstemperatur für verschiedene Lastzustände (30 %, 50 %, 75 %, 100 %) sowie deren Richtungsabhängigkeit von positiven (———) und negativen (- - -) Anregungen



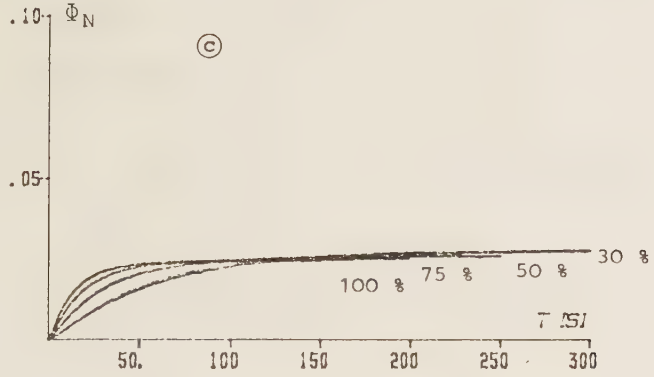




Bild C.3. Verlauf des Neutronenflusses $\Phi_N$ bei sprungförmiger Änderung ⓐ der Reaktivität ⓑ des Kühlmitteldurchsatzes und ⓒ der Kühlmitteleintrittstemperatur für verschiedene Laststände (30 %, 50 %, 75 %, 100 %) sowie deren Richtungsabhängigkeit von positiven (———) und negativen (- - -) Anregungen

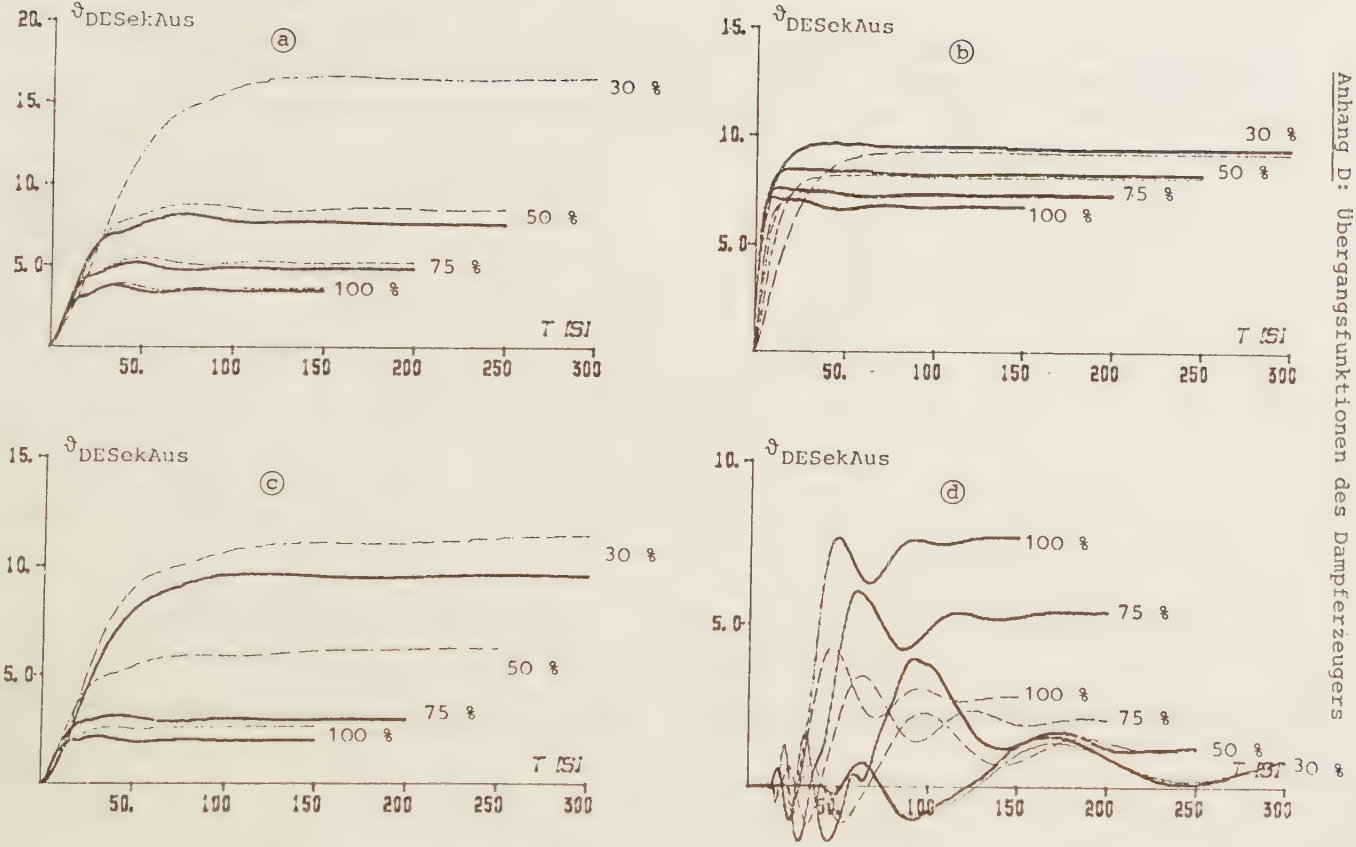



Bild D.1. Verlauf der Heizmittelaustrittstemperatur $\vartheta_{DESekAus}$ bei sprungförmiger Änderung ⓐ des Heizmitteldurchsatzes ⓑ der Speisewassertemperatur ⓒ des Speisewasserdurchsatzes ⓓ der Heizmitteleintrittstemperatur und ⓔ des Frischdampfdrucks für verschiedene Lastzustände (30 %, 50 %, 75 %, 100 %) sowie deren Richtungsabhängigkeit von positiven (———) und negativen (- - -) Anregungen

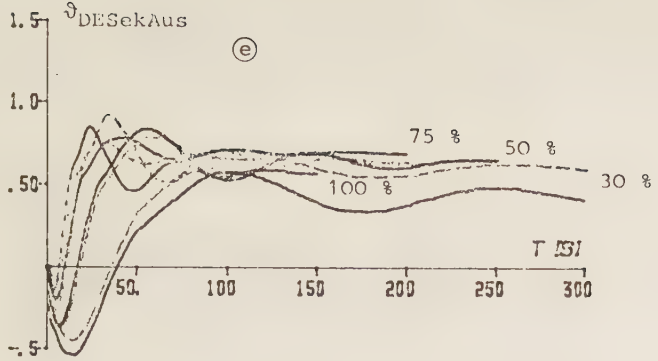



Bild D.1. Fortsetzung

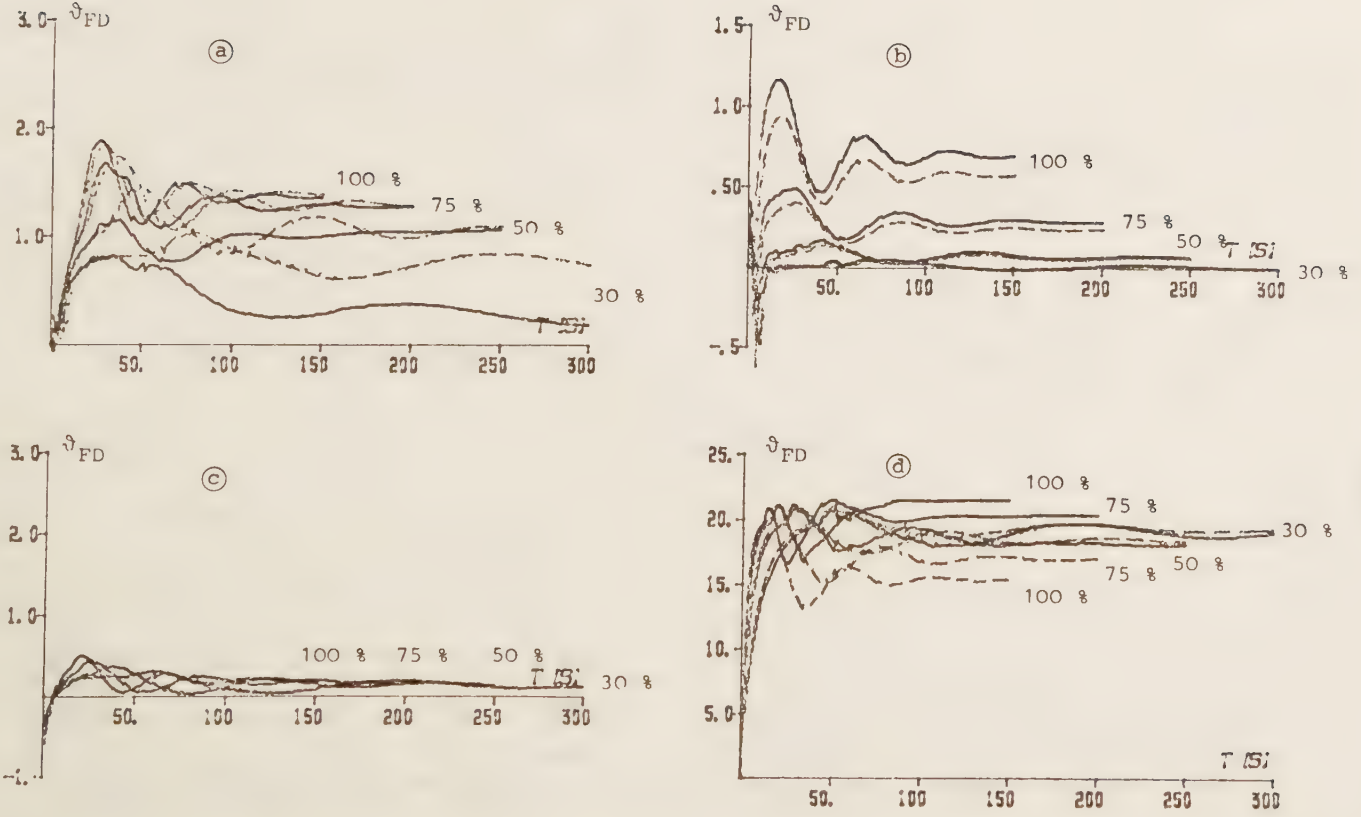



Bild D.2. Verlauf der Frischdampftemperatur $\vartheta_{FD}$ bei sprungförmiger Änderung ⓐ des Heizmitteldurchsatzes ⓑ der Speisewassertemperatur ⓒ des Speisewasserdurchsatzes ⓓ der Heizmitteleintrittstemperatur und ⓔ des Frischdampfdrucks für verschiedene Lastzustände (30 %, 50 %, 75 %, 100 %) sowie deren Richtungsabhängigkeit von positiven (———) und negativen (- - -) Anregungen

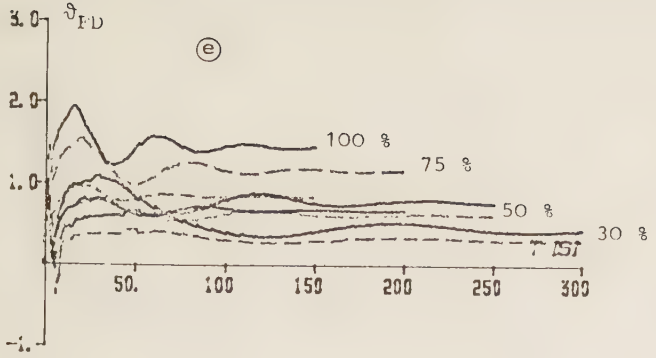



Bild D.2. Fortsetzung

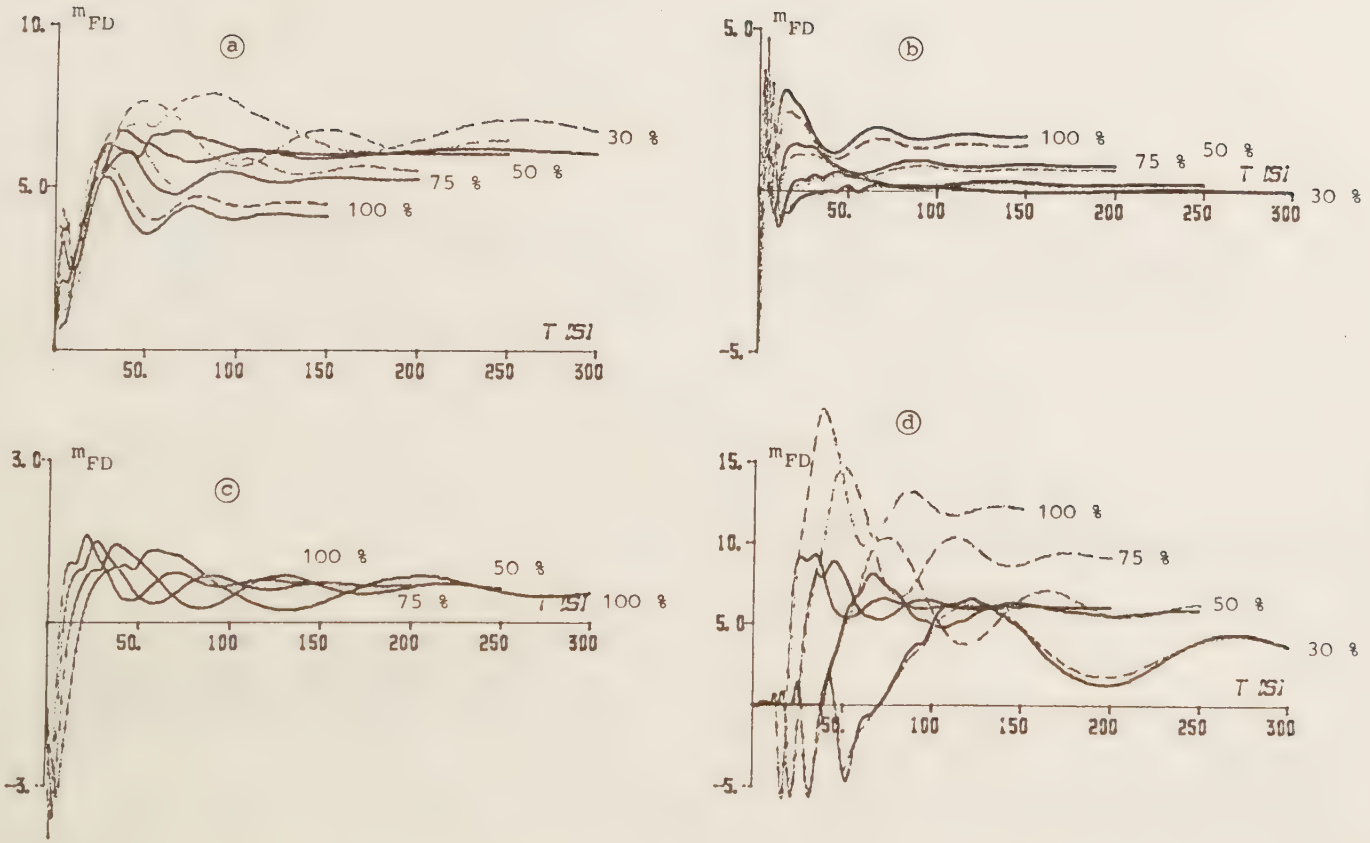



Bild D.3. Verlauf des Frischdampfdurchsatzes $m_{FD}$ bei sprungförmiger Änderung ⓐ des Heizmitteldurchsatzes ⓑ der Speisewassertemperatur ⓒ des Speisewasserdurchsatzes ⓓ der Zeizmitteleintrittstemperatur und ⓔ des Frischdampfdrucks für verschiedene Lastzustände (30 %, 50 %, 75 %, 100 %) sowie deren Richtungsabhängigkeit von positiven (——) und negativen (- - -) Anregungen

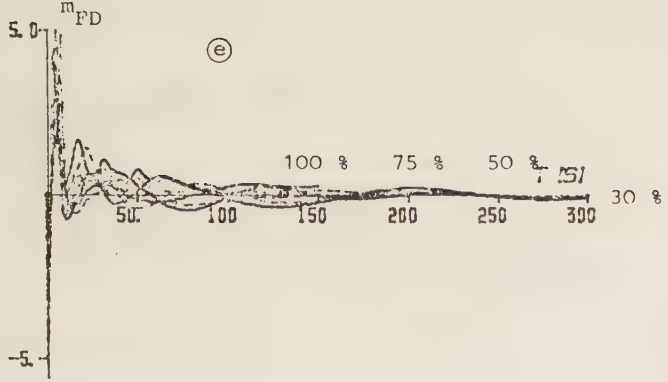



Bild D.3. Fortsetzung

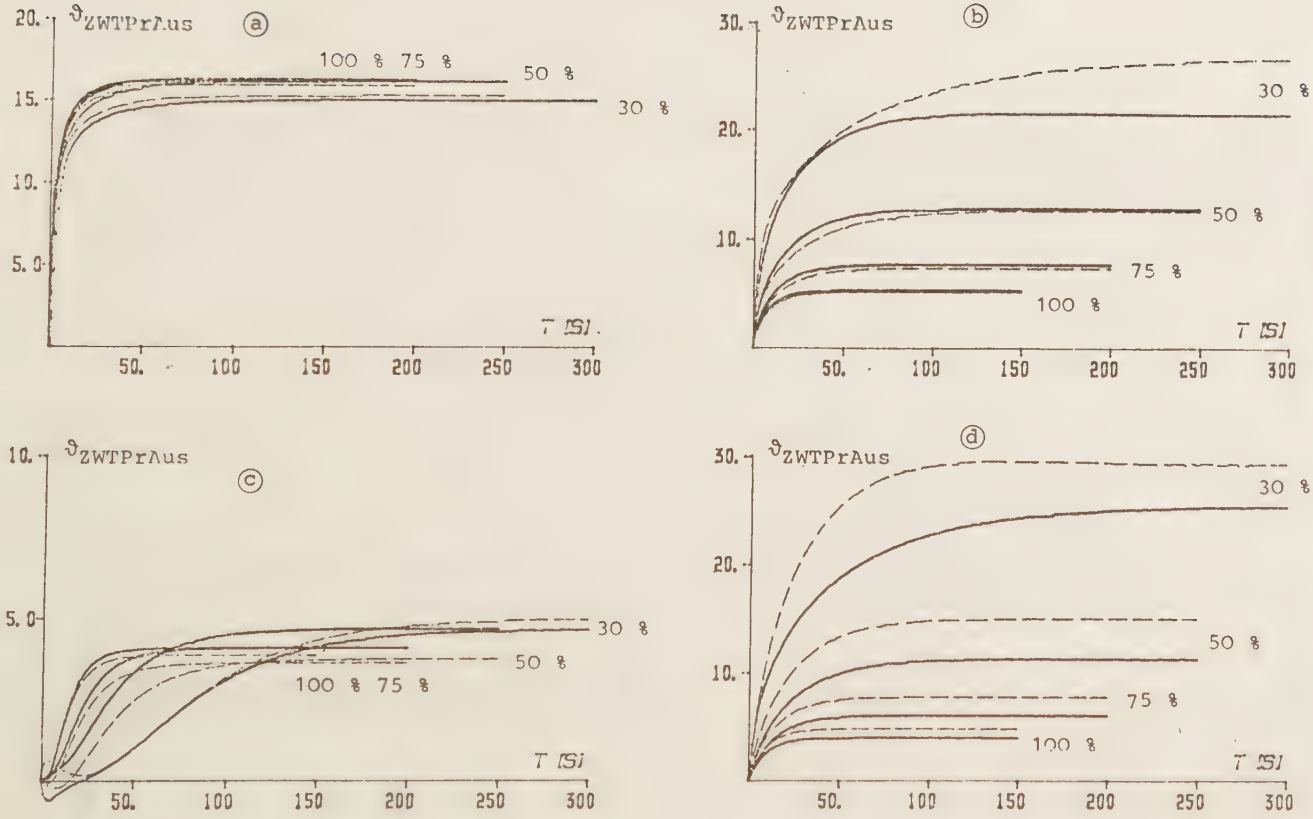



Bild E.1. Verlauf der primärseitigen Austrittstemperatur $\vartheta_{ZWTPrAus}$ des Zwischenwärmetauschers bei sprungförmiger Änderung ⓐ der sekundärseitigen Eintrittstemperatur ⓑ des Primärdurchsatzes ⓒ der primärseitigen Eintrittstemperatur und ⓓ des Sekundärdurchsatzes für verschiedene Lastzustände (30 %, 50 %, 75 %, 100 %) sowie deren Richtungsabhängigkeit von positiven (———) und negativen (- - -) Anregungen

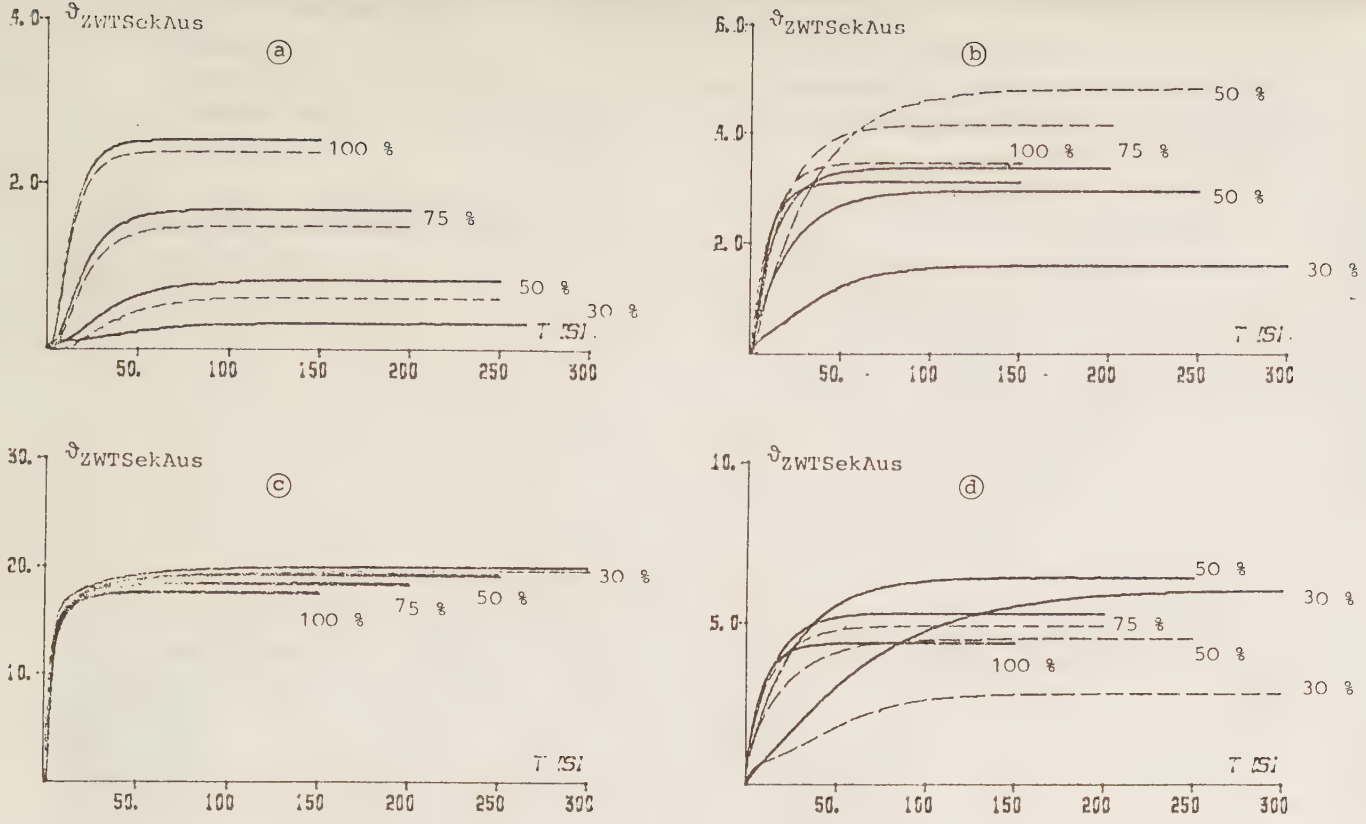



Bild E.2. Verlauf der sekundärseitigen Austrittstemperatur $\vartheta_{ZWTSekAus}$ des Zwischenwärmetauschers bei sprungförmiger Änderung ⓐ der sekundärseitigen Eintrittstemperatur ⓑ des Primärdurchsatzes ⓒ der primärseitigen Eintrittstemperatur und ⓓ des Sekundärdurchsatzes für verschiedene Lastzustände (30 %, 50 %, 75 %, 100 %) sowie deren Richtungsabhängigkeit von positiven (———) und negativen (- - -) Anregungen

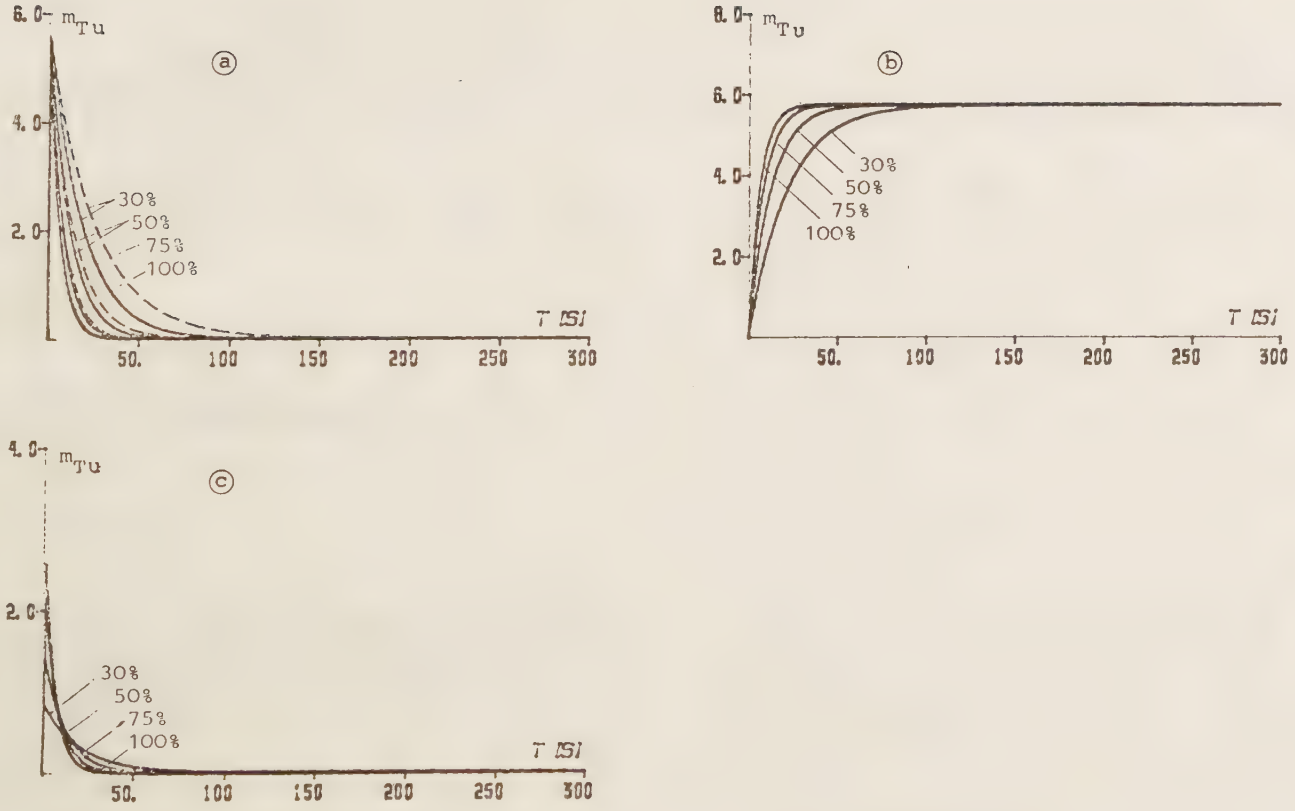
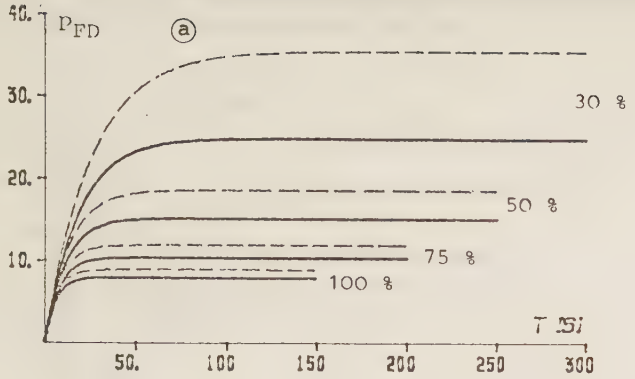
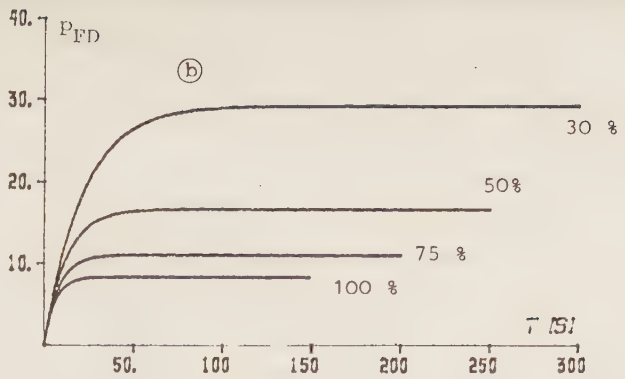



Bild F.1. Verlauf des Turbinendurchsatzes $m_{Tu}$ bei sprungförmiger Änderung ⓐ der Ventilstellung ⓑ des Frischdampfdurchsatzes und ⓒ der Frischdampftemperatur für verschiedene Lastzustände (30 %, 50 %, 75 %, 100 %) sowie deren Richtungsabhängigkeit von positiven (———) und negativen (- - -) Anregungen



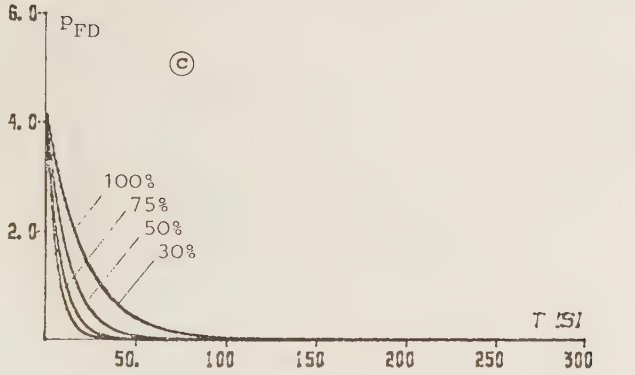




Bild F.2. Verlauf des Frischdampfdrucks $p_{FD}$ bei sprungförmiger Änderung ⓐ der Ventilstellung ⓑ des Frischdampfdurchsatzes und ⓒ der Frischdampftemperatur für verschiedene Lastzustände (30 %, 50 %, 75 %, 100 %) sowie deren Richtungsabhängigkeit von positiven (———) und negativen (- - -) Anregungen

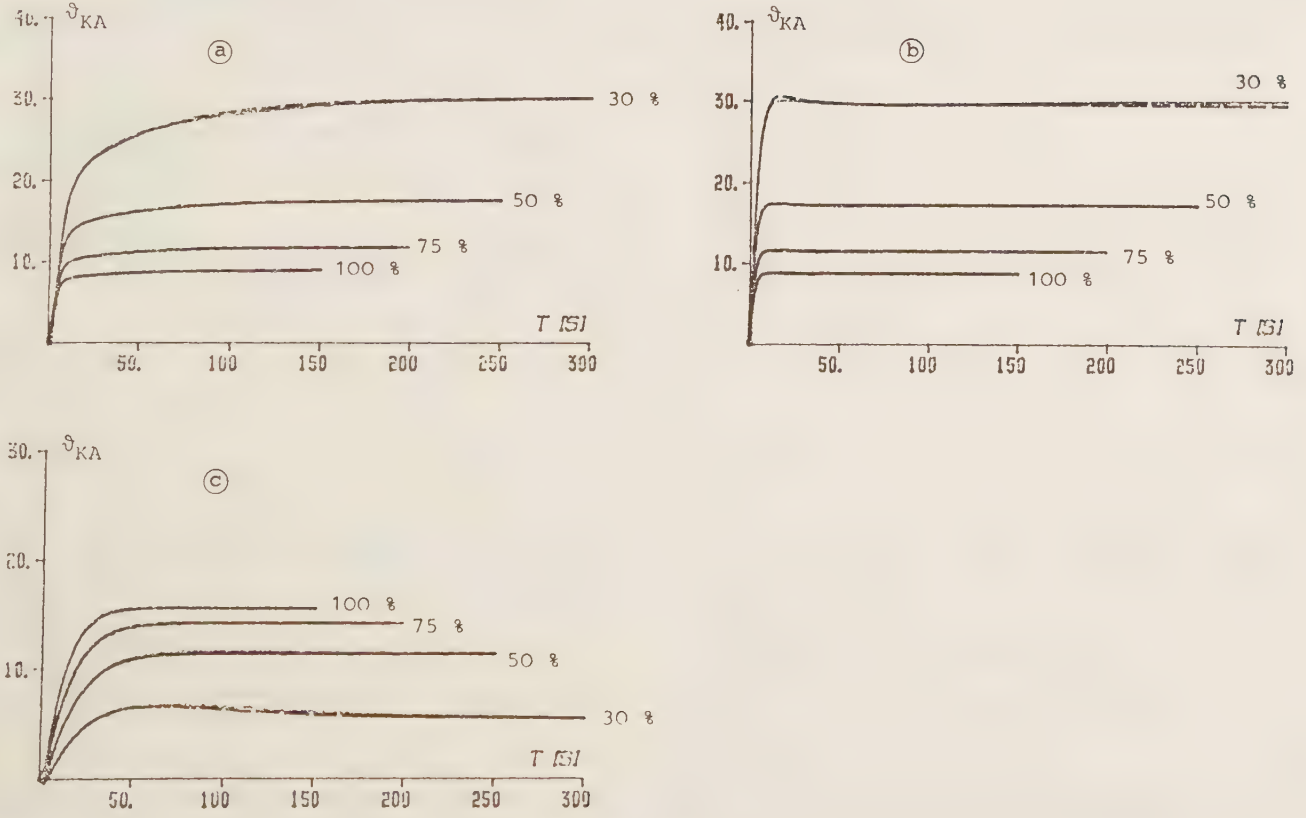



Bild G.1. Approximierter Verlauf (- - -) der Kernaustrittstemperatur $\vartheta_{KA}$ bei Änderung ⓐ der Reaktivität ⓑ des Kühlmitteldurchsatzes und ⓒ der Kühlmitteleintrittstemperatur

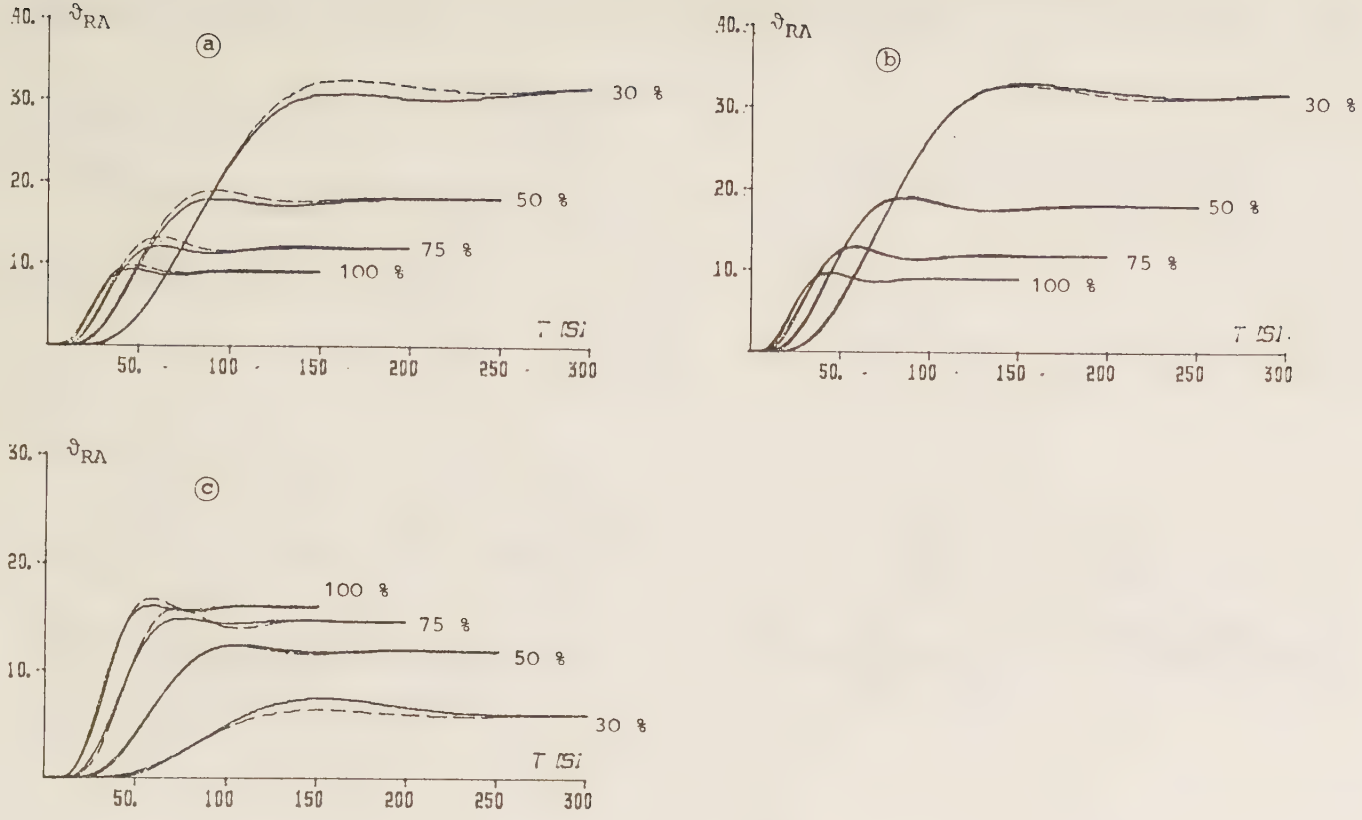
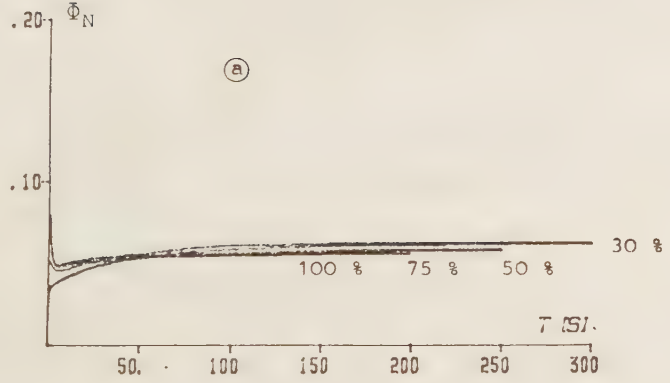
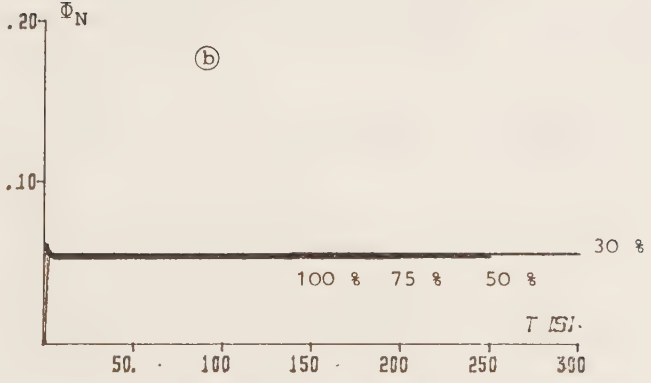



Bild G.2. Approximierter Verlauf (- - -) der Reaktoraustrittstemperatur $\vartheta_{RA}$ bei Änderung ⓐ der Reaktivität ⓑ des Kühlmitteldurchsatzes und ⓒ der Kühlmitteleintrittstemperatur



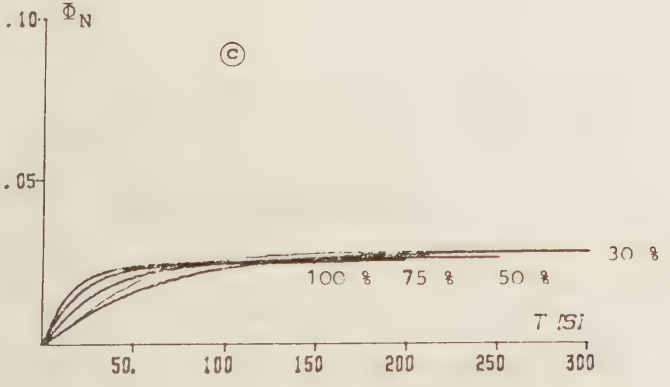




Bild G.3. Approximierter Verlauf (- - -) des Neutronenflusses $\Phi_N$ bei Änderung ⓐ der Reaktivität ⓑ des Kühlmitteldurchsatzes und ⓒ der Kühlmitteleintrittstemperatur

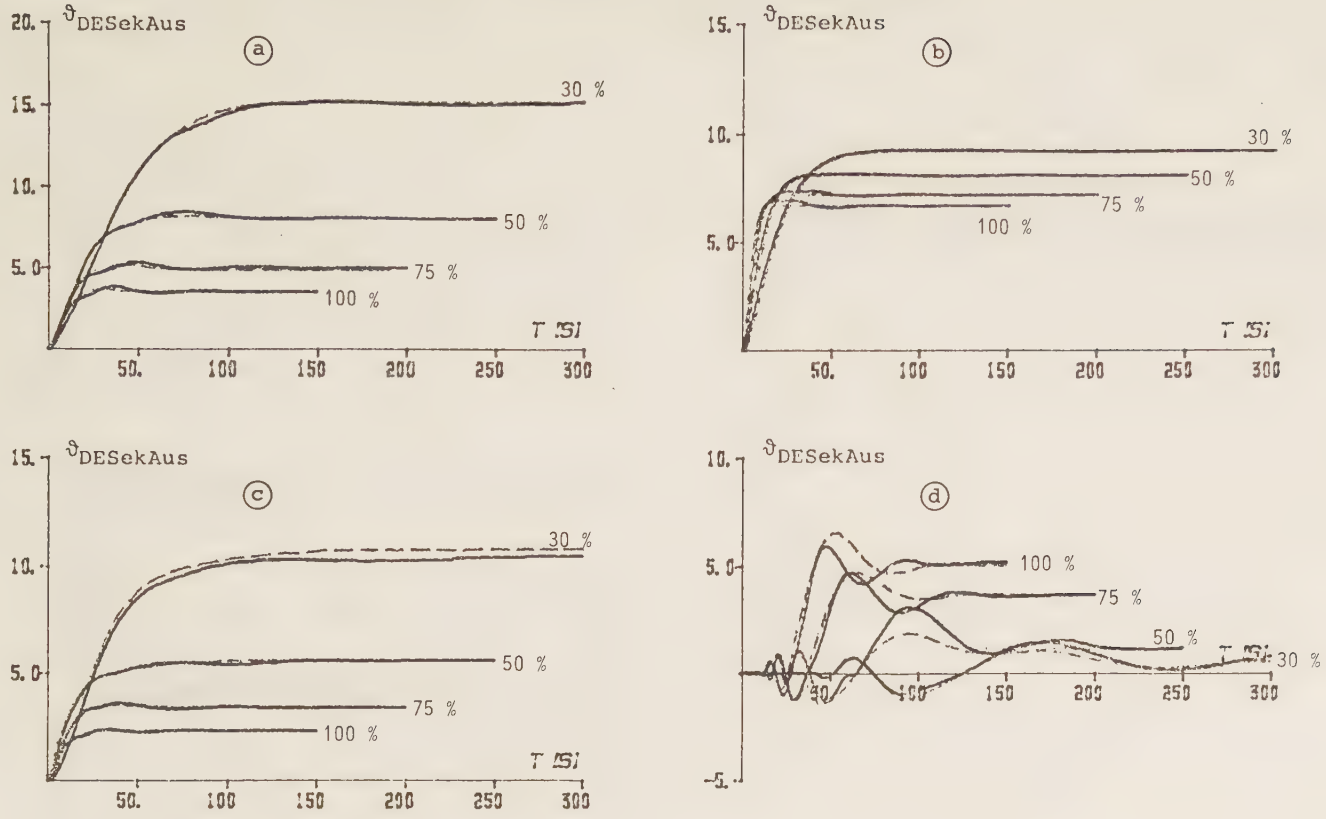



Bild H.1. Approximierter Verlauf (- - -) der Heizmittelaustrittstemperatur $\vartheta_{DESekAus}$ bei Änderung
ⓐ des Heizmitteldurchsatzes ⓑ der Speisewassertemperatur ⓒ des Speisewasserdurchsatzes
ⓓ der Heizmitteleintrittstemperatur und ⓔ des Frischdampfdrucks

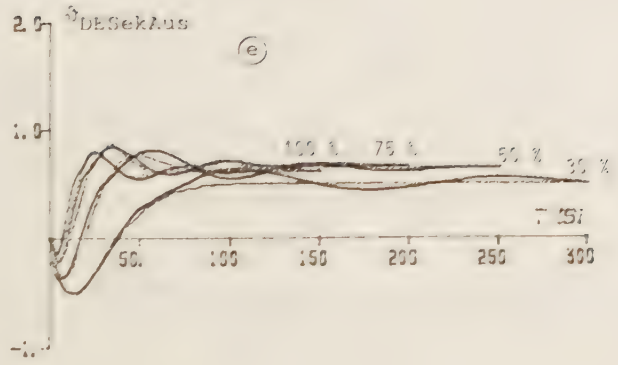



Bild H.1. Fortsetzung

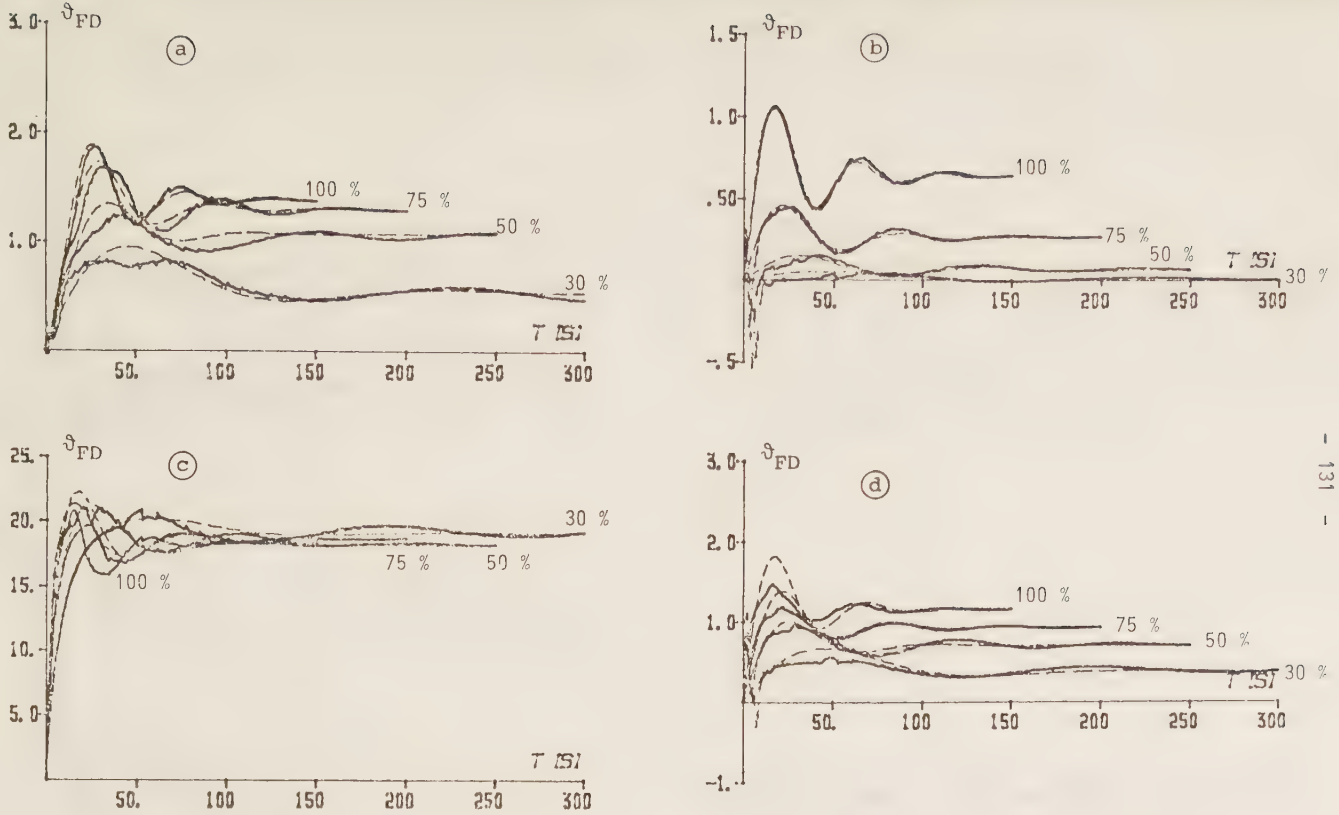



Bild H.2. Approximierter Verlauf (- - -) der Frischdampftemperatur $\vartheta_{FD}$ bei Änderung (a) des Heizmitteldurchsatzes (b) der Speisewassertemperatur (c) der Heizmitteleintrittstemperatur und (d) des Frischdampfdrucks

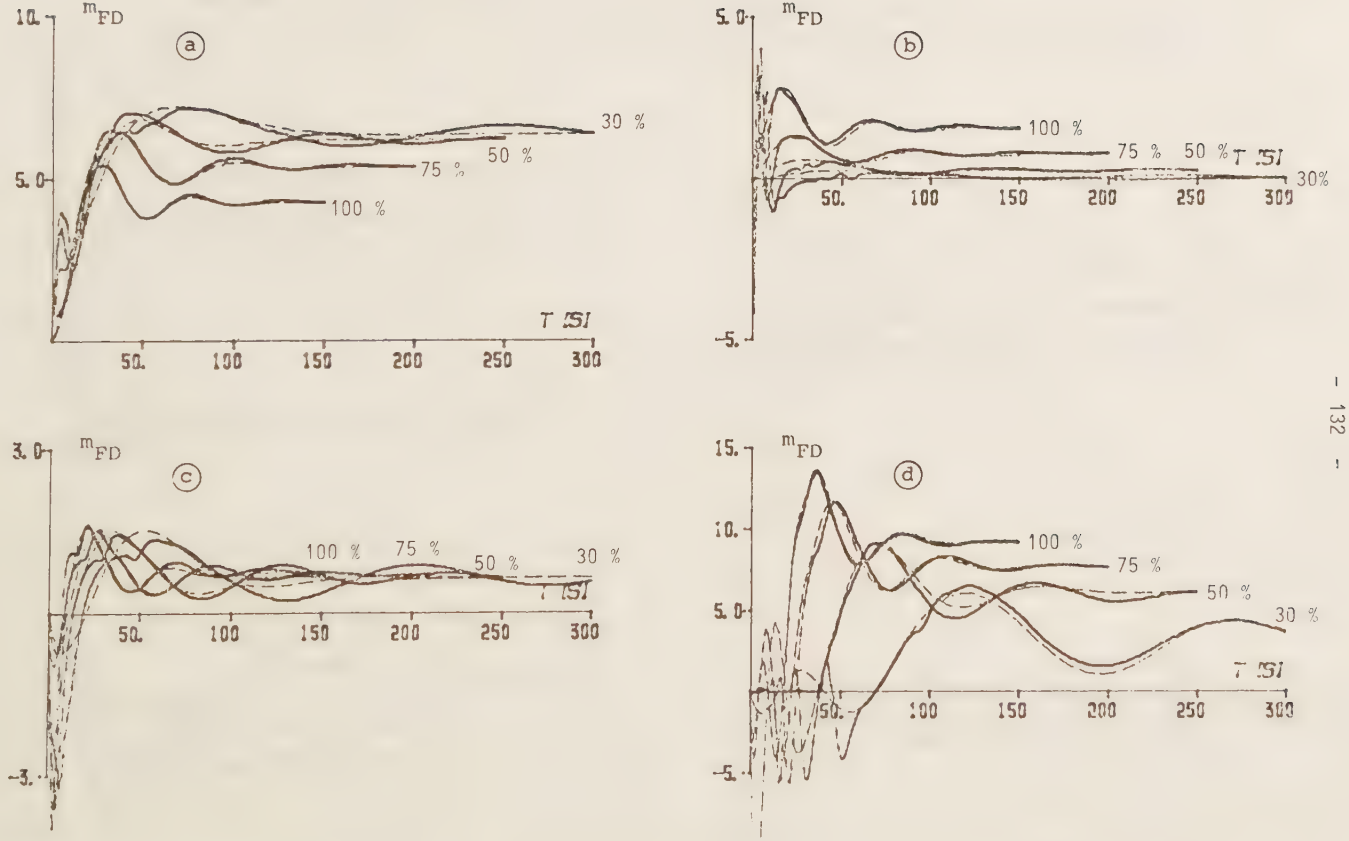



Bild H.3. Approximierter Verlauf (- - -) des Frischdampfdurchsatzes $m_{FD}$ bei Änderung ⓐ des Heizmitteldurchsatzes ⓑ der Speisewassertemperatur ⓒ des Speisewasserdurchsatzes ⓓ der Heizmitteleintrittstemperatur und ⓔ des Frischdampfdrucks

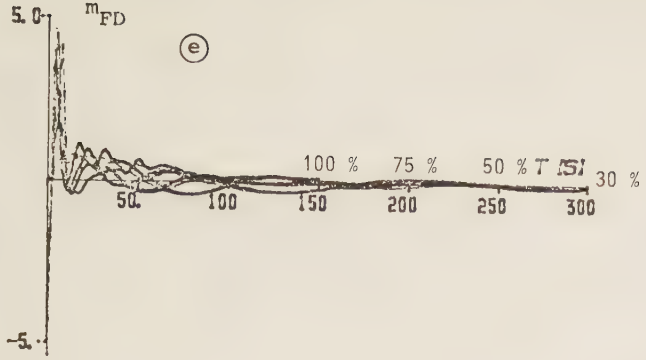



Bild H.3. Fortsetzung

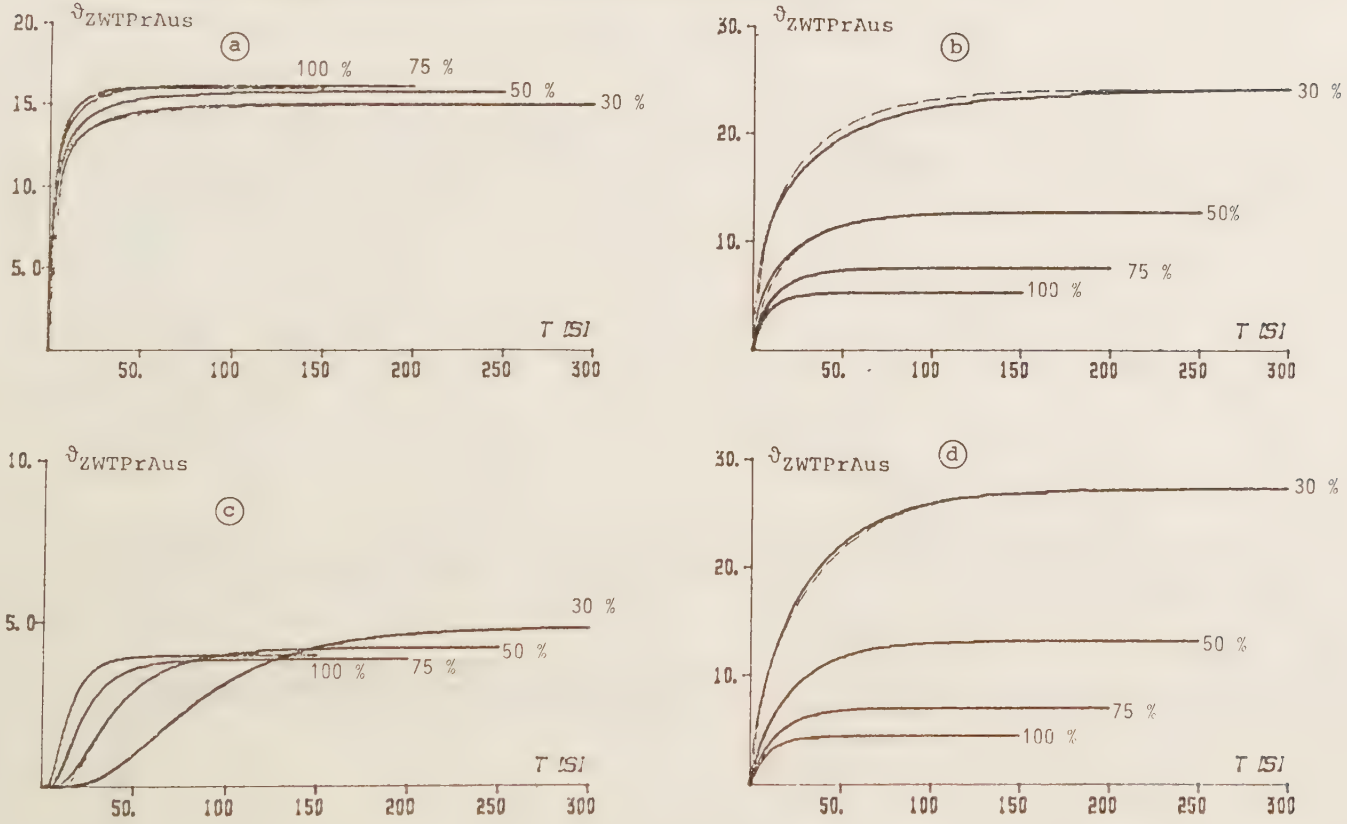



Bild I.1. Approximierter Verlauf (- - -) der primärseitigen Austrittstemperatur $\vartheta_{ZWTPrAus}$ des Zwischenwärmetauschers bei Änderung ⓐ der sekundärseitigen Eintrittstemperatur ⓑ des Primärdurchsatzes ⓒ der primärseitigen Eintrittstemperatur und ⓓ des Sekundärdurchsatzes

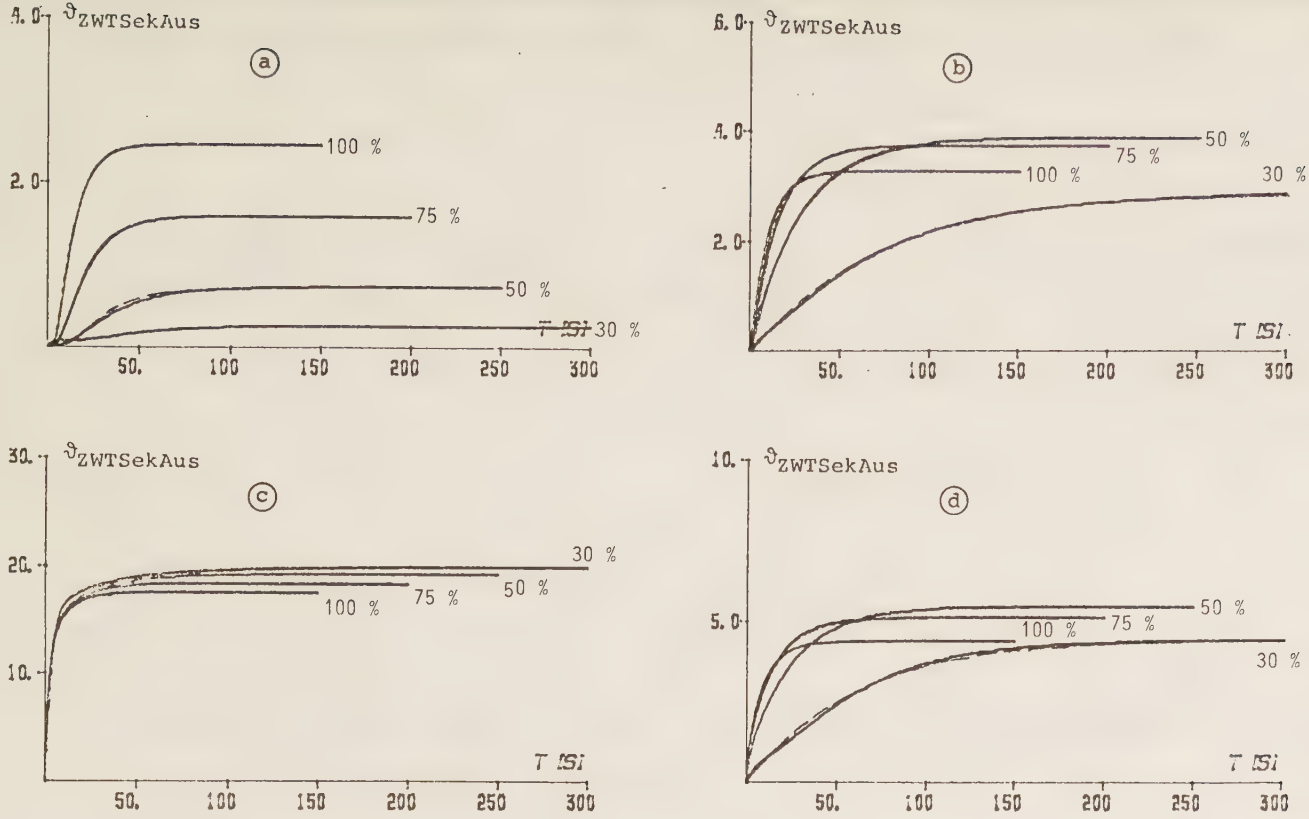
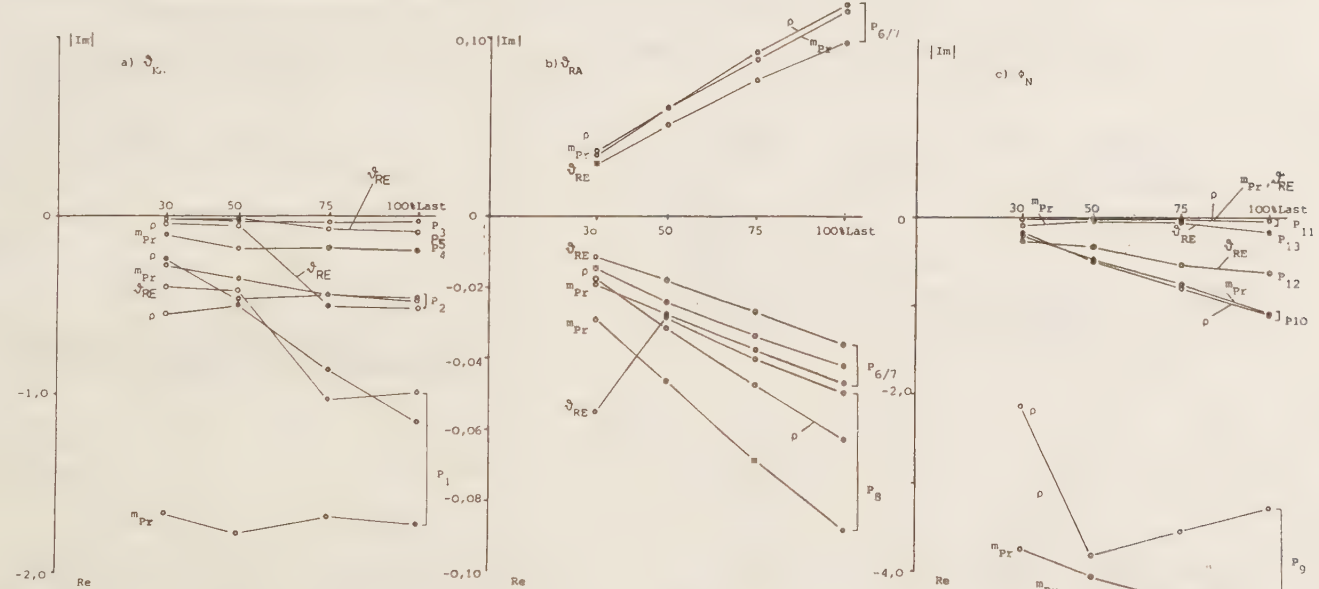



Bild I.2. Approximierter Verlauf der sekundärseitigen Austrittstemperatur $\vartheta_{ZWTSekAus}$ des Zwischenwärmetauschers bei Änderung ⓐ der sekundärseitigen Eintrittstemperatur ⓑ des Primärdurchsatzes ⓒ der primärseitigen Eintrittstemperatur und ⓓ des Sekundärdurchsatzes

Anhang J: Verlauf der Pole und des Verstärkungsfaktors in Abhängigkeit vom Lastzustand

Bild J.1a. Pole des Reaktors (Modell I)



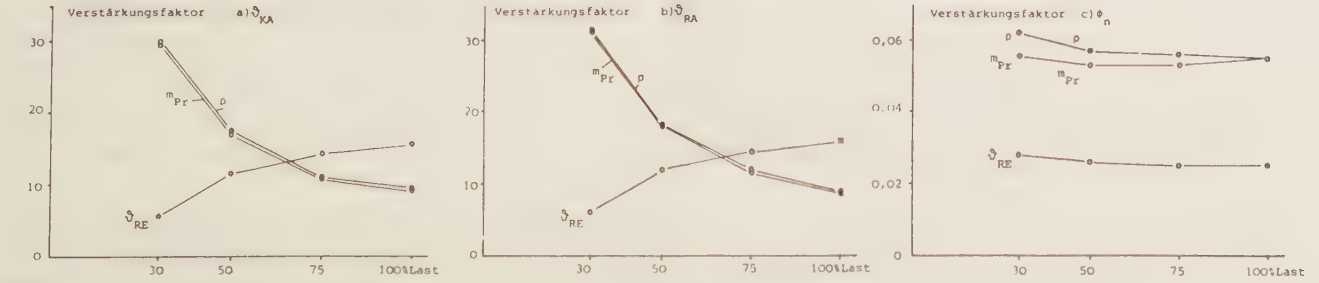




Bild J.1b. Verstärkungsfaktor des Reaktors (Modell I)

Bild J.2a. Pole des Dampferzeugers (Modell I)

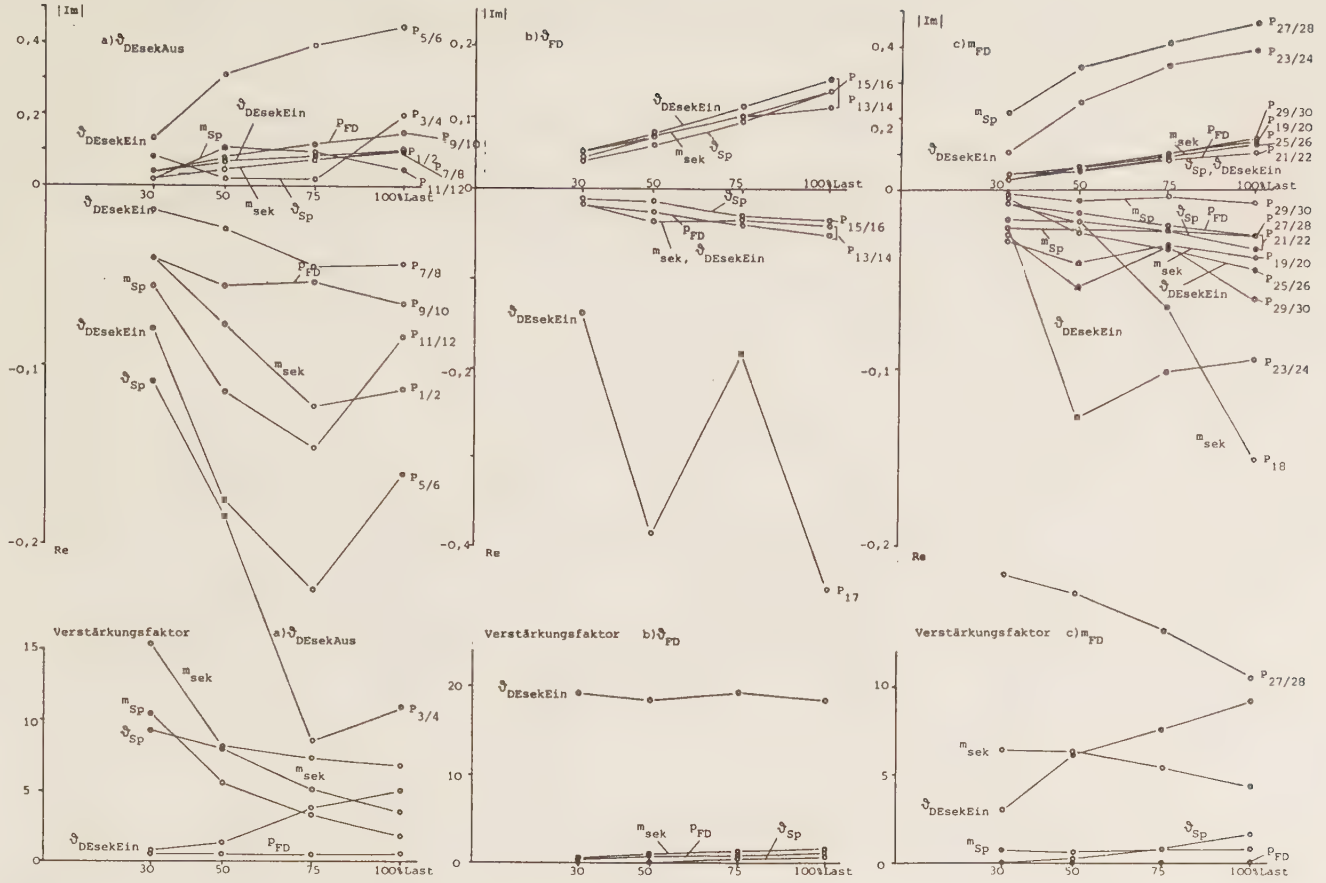



Bild J.2b. Verstärkungsfaktor des Dampferzeugers (Modell I)

Bild J.3a. Pole des Zwischenwärmetauschers (Modell I)

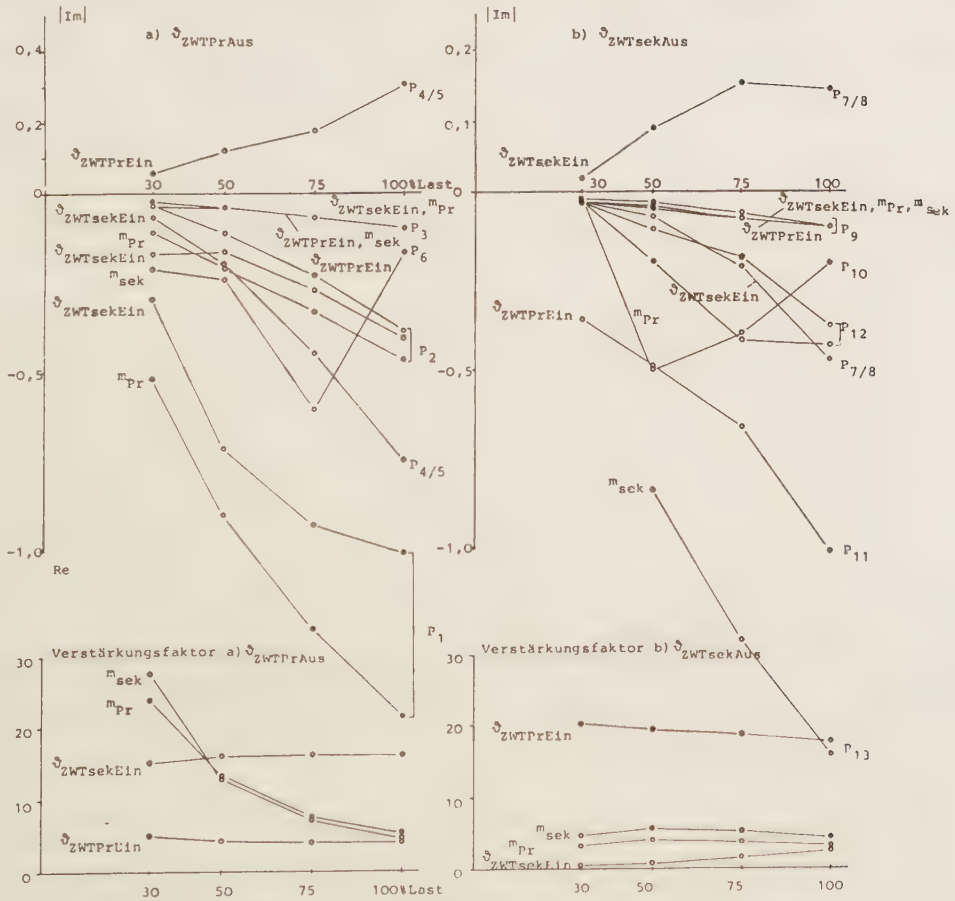



Bild J.3b. Verstärkungsfaktor des Zwischenwärmetauschers (Modell I)

Anhang K.1: Bewertungsfaktoren $C_E$, $C_A$, $C_F$ und C für Reaktor(Modell I)

ⓐ 100% Last

| Pol | Anz. d. Pole $n_P$ | Realteil Re | Imaginärteil \|Im\| | Bewertungsfaktor $C_E$ | $C_A$ | $C_F$ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | -1.15846 | 0. | 1.08050 | 0.97093 | 0.68E-6 | 0.89859 |
| | | -1.73554 | 0. | 0.55679 | 0.18519 | 0.19E-5 | 0.33260 |
| | | -0.98801 | 0. | 2.58264 | 0.07297 | 0.11E-5 | 0.02825 |
| $P_1$ | | -1.30704 | 0. | | | | 1.25944 |
| | 3 | -0.45890 | 0. | 1.08050 | 1.98687 | 0.68E-6 | 1.83884 |
| | | -0.47066 | 0. | 0.55679 | 1.45155 | 0.19E-5 | 2.60700 |
| | | -0.51970 | 0. | 2.58264 | 0.66964 | 0.11E-5 | 0.25929 |
| $P_2$ | | -0.46877 | 0. | | | | 4.70513 |
| | 3 | -0.04209 | 0.11018 | 1.08050 | 0.19542 | 0.52E-6 | 0.18086 |
| | | -0.04683 | 0.11475 | 0.55679 | 0.06889 | 0.70E-5 | 0.12375 |
| | | -0.03587 | 0.09687 | 2.58264 | 0.22454 | 0.27E-5 | 0.08693 |
| $P_{6/7}$ | | -0.04221 | 0.10867 | | | | 0.39154 |
| | 3 | -0.06322 | 0. | 1.08050 | 1.41139 | 0.52E-6 | 1.30624 |
| | | -0.08862 | 0. | 0.55679 | 1.25359 | 0.70E-5 | 2.25148 |
| | | -0.04995 | 0. | 2.58264 | 2.68869 | 0.27E-5 | 1.04106 |
| $P_8$ | | -0.07264 | 0. | | | | 4.59878 |
| | 2 | -3.28310 | 0. | 1.08050 | 0.49557 | 0.93E-6 | 0.45865 |
| | | -4.23336 | 0. | 0.55679 | 0.33024 | 0.20E-6 | 0.59311 |
| $P_9$ | | -3.81897 | 0. | | | | 1.05176 |
| | 2 | -1.10382 | 0. | 1.08050 | 0.11480 | 0.93E-6 | 0.10625 |
| | | -1.07835 | 0. | 0.55679 | 0.02484 | 0.20E-6 | 0.04461 |
| $P_{10}$ | | -1.09629 | 0. | | | | 0.15086 |

(b) 75% Last

| Pol | Anz. d. Pole $n_P$ | Realteil Re | Imaginärteil \|Im\| | Bewertungsfaktor $C_E$ | $C_A$ | $C_F$ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | | | | | | |
| | | -0.83373 | 0. | 1.02197 | 2.23879 | 0.16E-5 | 2.19066 |
| | | -1.69046 | 0. | 0.52687 | 0.32078 | 0.11E-5 | 0.60884 |
| | | -1.03346 | 0. | 3.01841 | 0.07224 | 0.26E-5 | 0.02393 |
| $P_1$ | | -1.02017 | 0. | | | | 2.82343 |
| | 3 | | | | | | |
| | | -0.44656 | 0. | 1.02197 | 3.69050 | 0.16E-5 | 3.61116 |
| | | -0.43715 | 0. | 0.52687 | 2.26858 | 0.21E-5 | 4.30577 |
| | | -0.50835 | 0. | 3.01841 | 0.59815 | 0.26E-5 | 0.19817 |
| $P_2$ | | -0.44308 | 0. | | | | 8.11510 |
| | 3 | | | | | | |
| | | -0.03365 | 0.09181 | 1.02197 | 0.16876 | 0.25E-5 | 0.16513 |
| | | -0.03751 | 0.08767 | 0.52687 | 0.03985 | 0.35E-5 | 0.07564 |
| | | -0.02703 | 0.07622 | 3.01841 | 0.92942 | 0.43E-5 | 0.30792 |
| $P_{6/7}$ | | -0.03046 | 0.08249 | | | | 0.54869 |
| | 3 | | | | | | |
| | | -0.04779 | 0. | 1.02197 | 2.00271 | 0.25E-5 | 1.95966 |
| | | -0.06919 | 0. | 0.52687 | 1.82945 | 0.35E-5 | 2.47230 |
| | | -0.04052 | 0. | 3.01841 | 2.47582 | 0.43E-5 | 0.82024 |
| $P_8$ | | -0.05872 | 0. | | | | 6.2522 |
| | 2 | | | | | | |
| | | -3.55305 | 0. | 1.02197 | 0.34677 | 0.47E-6 | 0.33932 |
| | | -4.33048 | 0. | 0.52687 | 0.29767 | 0.11E-5 | 0.56498 |
| $P_9$ | | -4.03877 | 0. | | | | 0.90430 |
| | 2 | | | | | | |
| | | -0.79680 | 0. | 1.02197 | 0.04189 | 0.47E-6 | 0.04099 |
| | | -0.76231 | 0. | 0.52687 | 0.01253 | 0.11E-5 | 0.02379 |
| $P_{10}$ | | -0.78413 | 0. | | | | 0.06477 |

© 50% Last

| Pol | Anz.d. Pole $n_P$ | Realteil Re | Imaginärteil \|Im\| | Bewertungsfaktor $C_E$ | $C_A$ | $C_F$ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | -0.49865 | 0. | 0.96993 | 34.20962 | 0.63E-6 | 35.27019 |
| | | -1.78769 | 0. | 0.5 | 0.55839 | 0. | 1.11678 |
| | | -0.42102 | 0. | 3.80952 | 0.52964 | 0.65E-6 | 0.13903 |
| $P_1$ | | -0.53777 | 0. | | | | 36.52600 |
| | 3 | -0.45953 | 0. | 0.96993 | 36.57343 | 0.63E-6 | 37.70729 |
| | | -0.35297 | 0. | 0.5 | 4.72203 | 0. | 9.44406 |
| | | -0.05958 | 0. | 3.80952 | 2.80813 | 0.65E-6 | 0.73713 |
| $P_2$ | | -0.43236 | 0. | | | | 47.88848 |
| | 3 | -0.02387 | 0.06140 | 0.96993 | 0.39104 | 0.53E-4 | 0.40316 |
| | | -0.02748 | 0.05936 | 0.5 | 0.37774 | 0.49E-5 | 0.75548 |
| | | -0.01782 | 0.05093 | 3.80952 | 0.14667 | 0.11E-3 | 0.03850 |
| $P_{6/7}$ | | -0.02595 | 0.05977 | | | | 1.19714 |
| | 3 | -0.03168 | 0. | 0.96993 | 3.73687 | 0.53E-4 | 3.85272 |
| | | -0.04675 | 0. | 0.5 | 3.67620 | 0.49E-5 | 7.3524 |
| | | -0.02860 | 0. | 3.80952 | 2.35034 | 0.11E-3 | 0.6196 |
| $P_8$ | | -0.04089 | 0. | | | - | - 11.82208 |
| | 2 | -3.81013 | 0. | 0.96993 | 0.22309 | 0.43E-6 | 0.23001 |
| | | -4.05788 | 0. | 0.5 | 0.25853 | 0.27E-5 | 0.51706 |
| $P_9$ | | -3.98160 | 0. | | | | 0.74707 |
| | 2 | -0.48392 | 0. | 0.96993 | 0.00832 | 0.43E-6 | 0.00858 |
| | | -0.45780 | 0. | 0.5 | 0.00526 | 0.27E-5 | 0.01052 |
| $P_{10}$ | | -0.46953 | 0. | | | | 0.0191 |

ⓓ 30% Last

| Pol | Anz.d. Pole $n_P$ | Realteil Re | Imaginärteil \|Im\| | Bewertungsfaktor $C_E$ | $C_A$ | $C_F$ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | -0.55095 | 0. | 0.93197 | 4.81867 | 0.24E-5 | 5.17041 |
| | | -1.66892 | 0. | 0.48040 | 1.15154 | 0.17E-5 | 2.39704 |
| | | -0.39841 | 0. | 5.05817 | 0.40957 | 0.52E-6 | 0.08097 |
| $P_1$ | | -0.89971 | 0. | | | | 7.64842 |
| | 3 | -0.24559 | 0. | 0.93197 | 9.11042 | 0.24E-5 | 9.77544 |
| | | -0.28243 | 0. | 0.48040 | 9.16123 | 0.17E-5 | 19.07000 |
| | | -0.04582 | 0. | 5.05817 | 2.58989 | 0.52E-6 | 0.51202 |
| $P_2$ | | -0.26601 | 0. | | | | 29.36046 |
| | 3 | -0.01449 | 0.03652 | 0.93197 | 1.02162 | 0.13E-3 | 1.09620 |
| | | -0.01931 | 0.03405 | 0.48040 | 1.65341 | 0.31E-5 | 3.44174 |
| | | -0.00991 | 0.02920 | 5.05817 | 0.57486 | 0.76E-5 | 0.11365 |
| $P_{6/7}$ | | -0.01795 | 0.03451 | | | | 4.65159 |
| | 3 | -0.01802 | 0. | 0.93197 | 8.31057 | 0.13E-3 | 8.91721 |
| | | -0.02958 | 0. | 0.48040 | 8.89998 | 0.31E-5 | 18.52619 |
| | | -0.03579 | 0. | 5.05817 | 0.80613 | 0.76E-5 | 0.15938 |
| $P_8$ | | -0.2588 | 0. | | | | 27.60278 |
| | 2 | -2.14192 | 0. | 0.93197 | 0.07421 | 0.50E-5 | 0.07962 |
| | | -3.75985 | 0. | 0.48040 | 0.21608 | 0.24E-5 | 0.44979 |
| $P_9$ | | -3.51651 | | | | | 0.52942 |
| | 2 | -0.09115 | 0. | 0.93197 | 0.00050 | 0.50E-5 | 0.00054 |
| | | -0.10034 | 0. | 0.48040 | 0.00318 | 0.24E-5 | 0.00662 |
| $P_{10}$ | | -0.09965 | 0. | | | | 0.00716 |

Anhang K.2: Bewertungsfaktoren $C_E$, $C_A$, $C_F$ und C für Dampferzeuger (Modell I)

ⓐ 100% Last

| Pol | Anz.d. Pole $n_P$ | Realteil Re | Imaginärteil \|Im\| | Bewertungsfaktor $C_E$ | $C_A$ | $C_F$ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | -0.04 | 0.115 | 0.47393 | 0.03961 | 0.56E-6 | 0.08358 |
| | | -0.04053 | 0.15517 | 5.34188 | 0.01828 | 0.21E-5 | 0.00342 |
| | | -0.05514 | 0.13833 | 0.38462 | 0.03290 | 0.27E-6 | 0.08554 |
| $P_{13/14}$ | | -0.04752 | 0.12398 | | | | 0.17254 |
| | 2 | | | | | | |
| | | -0.03291 | 0.12158 | 3.52485 | 0.14291 | 0.68E-6 | 0.04054 |
| | | -0.025 | 0.1112 | 0.38462 | 0.01297 | 0.89E-6 | 0.03372 |
| $P_{21/22}$ | | -0.02932 | 0.11687 | | | | 0.07426 |

ⓑ 75% Last

| Pol | Anz.d. Pole $n_P$ | Realteil Re | Imaginärteil \|Im\| | Bewertungsfaktor $C_E$ | $C_A$ | $C_F$ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | | | | | | |
| | | -0.0365 | 0.1 | 0.47664 | 0.03711 | 0.20E-6 | 0.07786 |
| | | -0.03304 | 0.11479 | 6.76819 | 0.04218 | 0.32E-4 | 0.00623 |
| | | -0.03944 | 0.10466 | 0.38462 | 0.02647 | 0.19E-6 | 0.06882 |
| $P_{13/14}$ | | -0.03768 | 0.1027 | | | | 0.15291 |
| | 2 | | | | | | |
| | | -0.02146 | 0.09028 | 3.67816 | 0.06466 | 0. | 0.01758 |
| | | -0.02019 | 0.08280 | 0.38462 | 0. | 0.18E-6 | 0. |
| $P_{21/22}$ | | -0.02146 | 0.09028 | | | | 0.01758 |

ⓒ 50% Last

| Pol | Anz.d. Pole $n_P$ | Realteil Re | Imaginärteil \|Im\| | Bewertungsfaktor $C_E$ | $C_A$ | $C_F$ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | -0.03636<br>-0.03556<br>-0.02464 | 0.07961<br>0.07799<br>0.07373 | 0.4845<br>10.005<br>0.38462 | 0.03057<br>0.17107<br>0.01994 | 0.12E-6<br>0.13E-4<br>0.45E-6 | 0.0631<br>0.0171<br>0.05184 |
| $P_{13/14}$ | | -0.03166 | 0.07709 | | | | 0.13204 |
| | 2 | -0.0175<br>-0.01207 | 0.05302<br>0.05851 | 3.91512<br>0.38462 | 0.01821<br>0. | 0.43E-6<br>0. | 0.00465<br>0. |
| $P_{21/22}$ | | -0.0175 | 0.05302 | | | | 0.00465 |

ⓓ 30% Last

| Pol | Anz.d. Pole $n_P$ | Realteil Re | Imaginärteil \|Im\| | Bewertungsfaktor $C_E$ | $C_A$ | $C_F$ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | -0.01837<br>-0.01675<br>-0.017 | 0.03341<br>0.05137<br>0.043 | 0.49456<br>18.03427<br>0.38462 | 0.01543<br>0.08079<br>0.01066 | 0.<br>0.14E-4<br>0.22E-6 | 0.0312<br>0.00448<br>0.02772 |
| $P_{13/14}$ | | -0.01766 | 0.03887 | | | | 0.0634 |
| | 2 | -0.00779<br>-0.00754 | 0.02416<br>0.03627 | 4.18831<br>0.38462 | 0.00028<br>0. | 0.36E-6<br>0.74E-6 | 0.00007<br>0. |
| $P_{21/22}$ | | -0.00779 | 0.02416 | | | | 0.00007 |

Anhang L: Analogrechenschaltbild des Reaktormodells (Modell I)

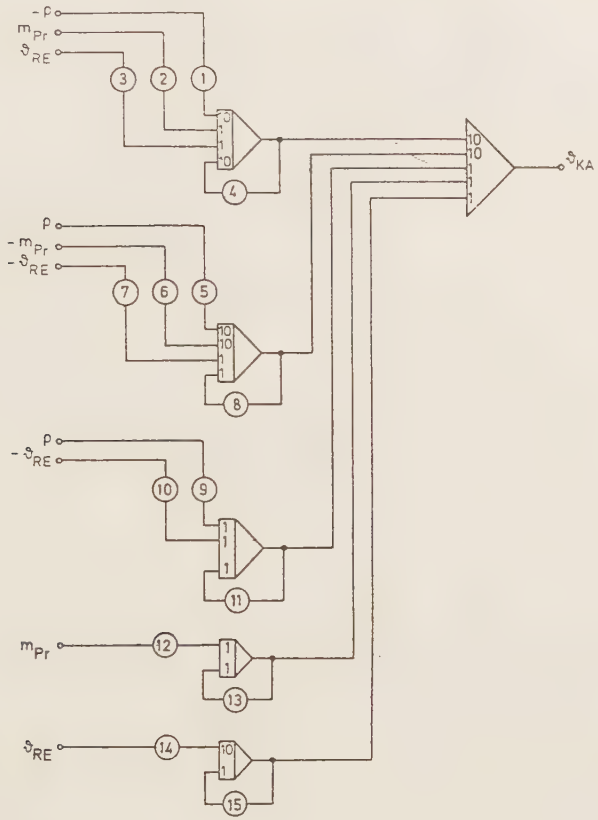



Bild L.1. Analogrechenschaltbild für die Kernaustrittstemperatur $\vartheta_{KA}$

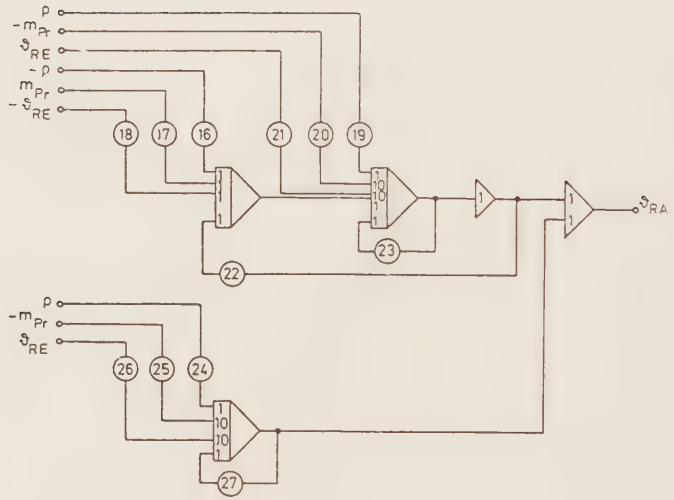



Bild L.2. Analogrechenschaltbild für die Reaktoraustrittstemperatur $\vartheta_{RA}$

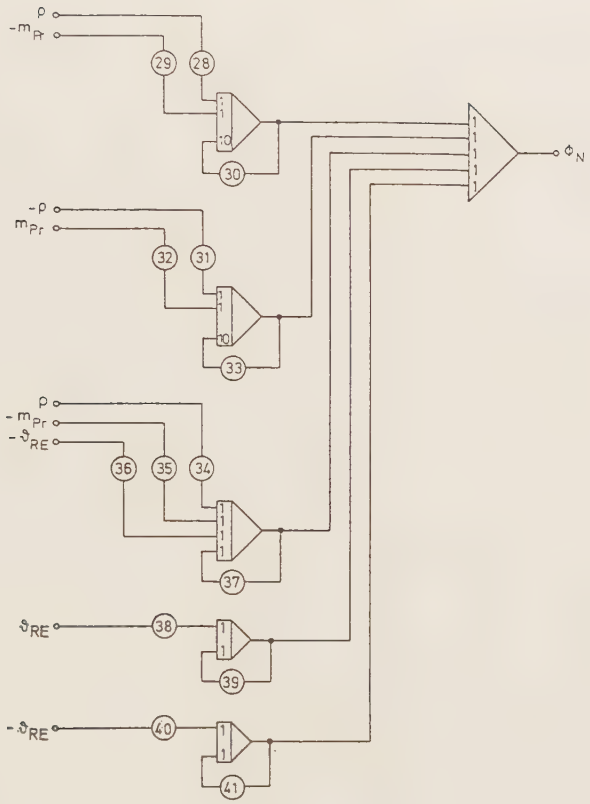



Bild L.3. Analogrechenschaltbild für den Neutronenfluß $\Phi_N$

| Poti | 100% | 75% | 50% | 30% |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.0802 | 0.1341 | 0.3288 | 0.1049 |
| 2 | 0.1530 | 0.1902 | -0.2203 | 0.3761 |
| 3 | 0.0650 | 0.4257 | -0.1428 | -0.0828 |
| 4 | 0.1100 | 0.0900 | 0.0500 | 0.0500 |
| 5 | 0.0746 | 0.1101 | 0.3156 | 0.0992 |
| 6 | 0.0545 | 0.0676 | 0.0593 | 0.1165 |
| 7 | 0.2635 | 0.1770 | 0.0017 | 0.0147 |
| 8 | 0.5000 | 0.4500 | 0.4000 | 0.2500 |
| 9 | 0.0408 | 0.0679 | 0.1160 | 0.2186 |
| 10 | 0.0258 | ——— | 0.0253 | 0.1186 |
| 11 | 0.0300 | 0.0300 | 0.0260 | 0.0190 |
| 12 | 0.1560 | 0.2520 | 0.3696 | 0.9534 |
| 13 | 0.2000 | 0.1800 | 0.1830 | 0.1000 |
| 14 | 0.1995 | 0.1354 | 0.0923 | 0.0646 |
| 15 | 0.0940 | 0.0760 | 0.0600 | 0.0460 |
| 16 | 0.0091 | -0.0025 | 0.0030 | 0.0015 |
| 17 | 0.0095 | 0.0024 | 0.0123 | 0.0152 |
| 18 | 0.0295 | 0.0036 | 0.0014 | -0.0043 |
| 19 | 0.7121 | 0.6905 | 0.7230 | 0.7276 |
| 20 | 0.0727 | 0.0730 | 0.0856 | 0.1076 |
| 21 | 0.1023 | 0.0786 | 0.0424 | 0.0070 |
| 22 | 0.0136 | 0.0077 | 0.0042 | 0.0015 |
| 23 | 0.0844 | 0.0609 | 0.0519 | 0.0359 |
| 24 | 0.7121 | 0.6905 | 0.7730 | 0.8476 |
| 25 | 0.0697 | 0.0710 | 0.0851 | 0.1076 |
| 26 | 0.1323 | 0.0886 | 0.0504 | 0.0082 |
| 27 | 0.0726 | 0.0587 | 0.0409 | 0.0259 |
| 28 | 0.5764 | 0.3942 | 0.2331 | 0.1225 |
| 29 | 0.2979 | 0.2776 | 0.2537 | 0.2021 |

| Poti | 100% | 75% | 50% | 30% |
|---|---|---|---|---|
| 30 | 0.3819 | 0.4039 | 0.3982 | 0.3517 |
| 31 | 0.1140 | 0.0412 | 0.0081 | 0.0004 |
| 32 | 0.0253 | 0.0129 | 0.0054 | 0.0010 |
| 33 | 0.1096 | 0.0784 | 0.0470 | 0.0010 |
| 34 | 0.0004 | 0.0006 | 0.0007 | 0.0009 |
| 35 | ——— | ——— | ——— | 0.0002 |
| 36 | 0.0002 | 0.0014 | 0.0008 | 0.0011 |
| 37 | 0.0428 | 0.0502 | 0.0390 | 0.0300 |
| 38 | 0.0013 | 0.0011 | 0.0005 | -0.0005 |
| 39 | 0.6228 | 0.5534 | 0.3359 | 0.2747 |
| 40 | 0.0018 | ——— | 0.0001 | -0.0012 |
| 41 | 0.0840 | 0.0255 | 0.0193 | 0.0762 |

Tabelle L.1. Potentiometereinstellwerte für das Analogrechenschaltbild des Reaktormodells

Anhang M: Analogrechenschaltbild des Dampferzeugermodells (Modell I)

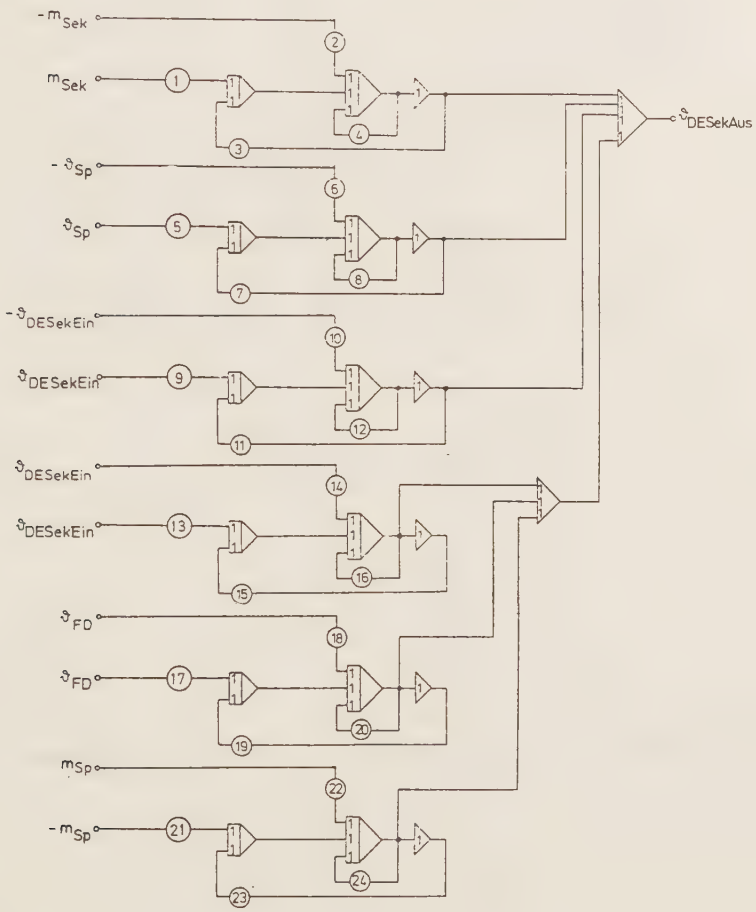



Bild M.1. Analogrechenschaltbild für die sekundärseitige Dampferzeugeraustrittstemperatur $\vartheta_{DESekAus}$

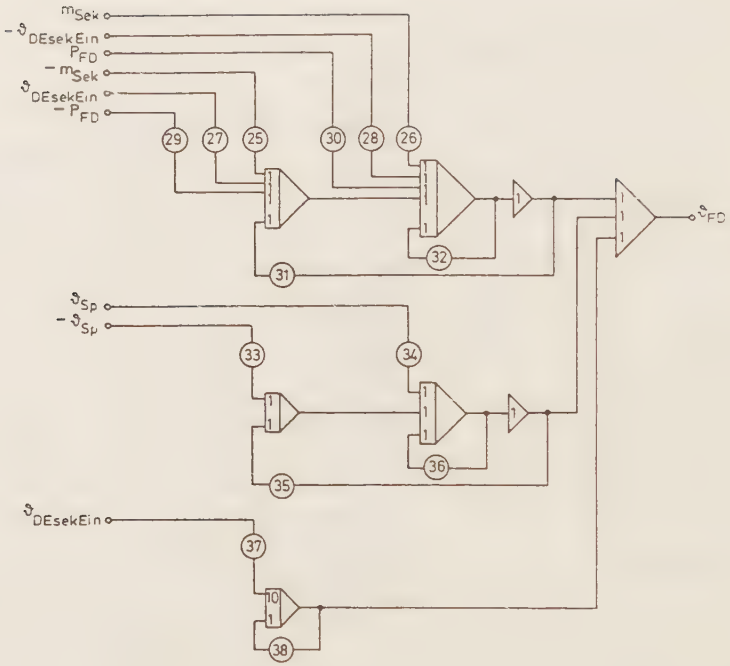



Bild M.2. Analogrechenschaltbild für die Frischdampftemperatur $\vartheta_{FD}$

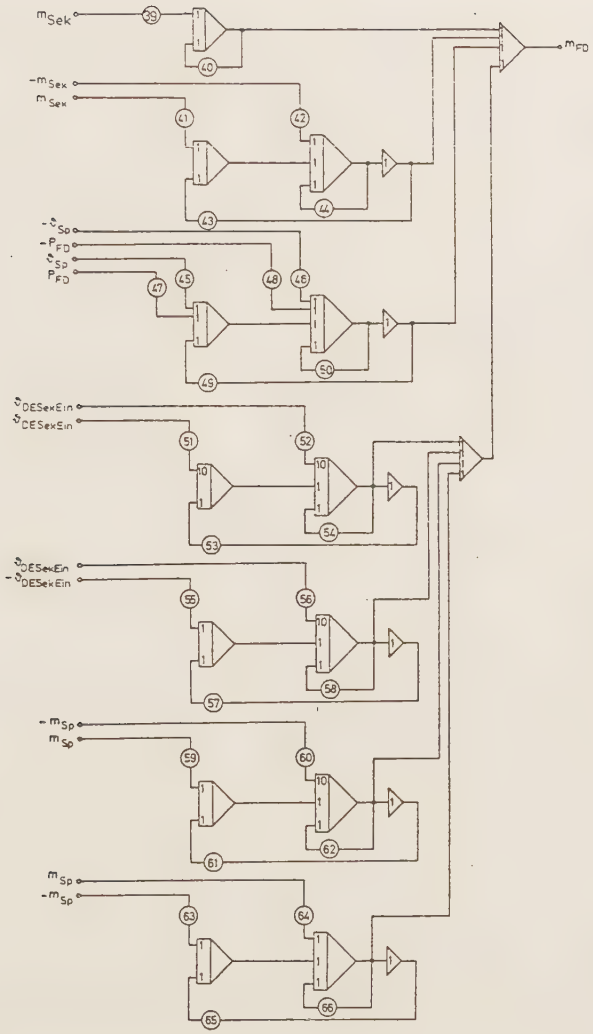



Bild M.3. Analogrechenschaltbild für den Frischdampfdurchsatz $m_{FD}$

| Poti | 100% | 75% | 50% | 30% | Poti | 100% | 75% | 50% | 30% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.0840 | 0.1044 | 0.0671 | 0.0302 | 36 | 0.0797 | 0.0722 | 0.0722 | 0.0364 |
| 2 | 0.0971 | 0.0696 | 0.0911 | 0.0732 | 37 | 0.7064 | 0.3156 | 0.4730 | 0.2300 |
| 3 | 0.0236 | 0.0206 | 0.0083 | 0.0020 | 38 | 0.4570 | 0.1830 | 0.3851 | 0.1403 |
| 4 | 0.2261 | 0.2472 | 0.1548 | 0.0820 | 39 | 0.5377 | 0.1460 | 0.1943 | 0.2826 |
| 5 | 0.8394 | 0.7085 | 0.2811 | 0.0845 | 40 | 0.4259 | 0.1965 | 0.0850 | 0.0600 |
| 6 | 0.1985 | -0.0736 | 0.1129 | 0.1617 | 41 | 0.0566 | 0.0492 | 0.0211 | 0.0030 |
| 7 | 0.1250 | 0.0980 | 0.0346 | 0.0091 | 42 | 0.200 | 0.0600 | ——— | ——— |
| 8 | 0.5870 | 0.6246 | 0.3696 | 0.1928 | 43 | 0.0188 | 0.0106 | 0.0053 | 0.0018 |
| 9 | 0.4343 | 0.6507 | 0.2722 | 0.0501 | 44 | 0.0815 | 0.0632 | 0.0534 | 0.0106 |
| 10 | 0.7114 | 0.8593 | 0.5443 | 0.2147 | 45 | 0.0227 | 0.0064 | 0.0007 | ——— |
| 11 | 0.2258 | 0.2061 | 0.1296 | 0.0241 | 46 | 0.2400 | 0.0820 | 0.0375 | 0.0100 |
| 12 | 0.3227 | 0.4526 | 0.3524 | 0.1597 | 47 | 0.0021 | ——— | ——— | ——— |
| 13 | 0.0356 | 0.0053 | -0.0046 | -0.0024 | 48 | 0.1200 | 0.1200 | 0.0750 | 0.0200 |
| 14 | 0.6883 | 0.7785 | 0.3203 | 0.1425 | 49 | 0.0145 | 0.0086 | 0.0031 | 0.0006 |
| 15 | 0.0113 | 0.0092 | 0.0051 | 0.0018 | 50 | 0.0586 | 0.0429 | 0.0350 | 0.0156 |
| 16 | 0.0856 | 0.0088 | 0.0483 | 0.0286 | 51 | 0.1743 | 0.1551 | 0.1091 | 0.0070 |
| 17 | 0.0166 | 0.0111 | 0.0062 | 0.0018 | 52 | 0.0477 | 0.2040 | 0.7026 | 0.0229 |
| 18 | 0.0709 | 0.0771 | 0.1002 | 0.0827 | 53 | 0.1605 | 0.1302 | 0.0772 | 0.0119 |
| 19 | 0.0267 | 0.0166 | 0.0095 | 0.0035 | 54 | 0.1893 | 0.2012 | 0.2546 | 0.0830 |
| 20 | 0.1302 | 0.1060 | 0.1108 | 0.0800 | 55 | 0.0313 | 0.0454 | 0.0424 | 0.0051 |
| 21 | 0.0213 | 0.1040 | 0.0692 | 0.0367 | 56 | 0.3000 | 0.1900 | 0.1280 | 0.0226 |
| 22 | 0.2245 | -0.0290 | 0.1992 | -0.0097 | 57 | 0.0188 | 0.0106 | 0.0053 | 0.0018 |
| 23 | 0.0092 | 0.0306 | 0.0123 | 0.0035 | 58 | 0.0815 | 0.0632 | 0.0534 | 0.0106 |
| 24 | 0.1691 | 0.2934 | 0.2217 | 0.1128 | 59 | 0.5950 | 0.5790 | 0.5000 | 0.0107 |
| 25 | 0.0229 | 0.0149 | 0.0082 | 0.0009 | 60 | 0.2956 | 0.2000 | 0.1358 | 0.1600 |
| 26 | ——— | 0.0240 | 0.0338 | 0.0420 | 61 | 0.2917 | 0.2316 | 0.1702 | 0.0500 |
| 27 | 0.0495 | 0.0170 | 0.0456 | 0.0045 | 62 | 0.5492 | 0.4965 | 0.4524 | 0.4327 |
| 28 | 0.7000 | 0.8500 | 0.6400 | 0.1200 | 63 | 0.0525 | 0.0339 | 0.0190 | 0.0014 |
| 29 | 0.0190 | 0.0107 | 0.0053 | 0.0006 | 64 | 0.1200 | 0.1400 | 0.1500 | 0.0260 |
| 30 | 0.1500 | 0.0900 | 0.0650 | 0.0300 | 65 | 0.0188 | 0.0106 | 0.0053 | 0.0018 |
| 31 | 0.0165 | 0.0115 | 0.0076 | 0.0016 | 66 | 0.0815 | 0.0632 | 0.0534 | 0.0106 |
| 32 | 0.0797 | 0.0722 | 0.0722 | 0.0364 | | | | | |
| 33 | 0.0106 | 0.0030 | 0.0005 | ——— | | | | | |
| 34 | 0.1200 | 0.0450 | 0.0100 | 0.0033 | | | | | |
| 35 | 0.0165 | 0.0115 | 0.0076 | 0.0016 | | | | | |

Tabelle M.1. Potentiometereinstellwerte für das Analogrechenschaltbild des Dampferzeugermodells

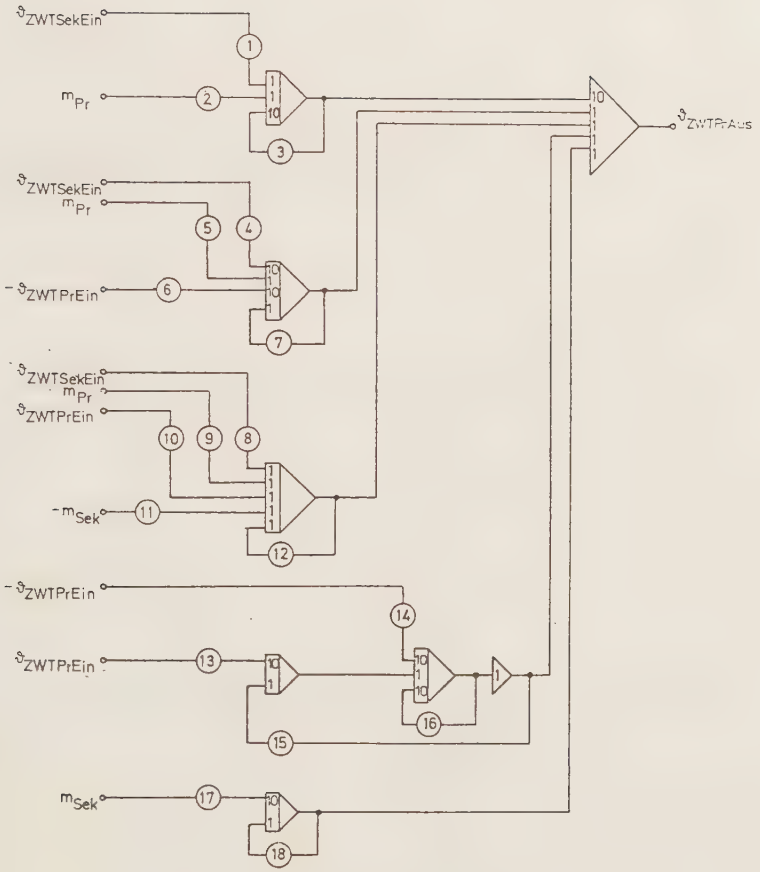



Bild N.1. Analogrechenschaltbild für die primärseitige Zwischenwärmetauscheraustrittstemperatur $\vartheta_{ZWTPrAus}$

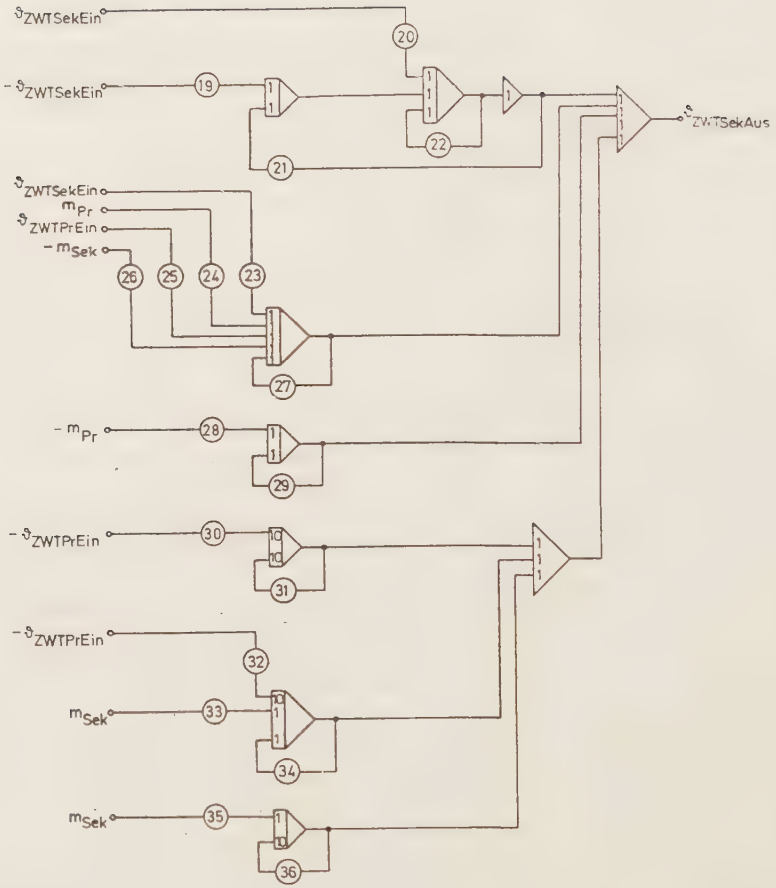



Bild N.2. Analogrechenschaltbild für die sekundärseitige Zwischenwärmetauscheraustrittstemperatur $\vartheta_{ZWTSekAus}$

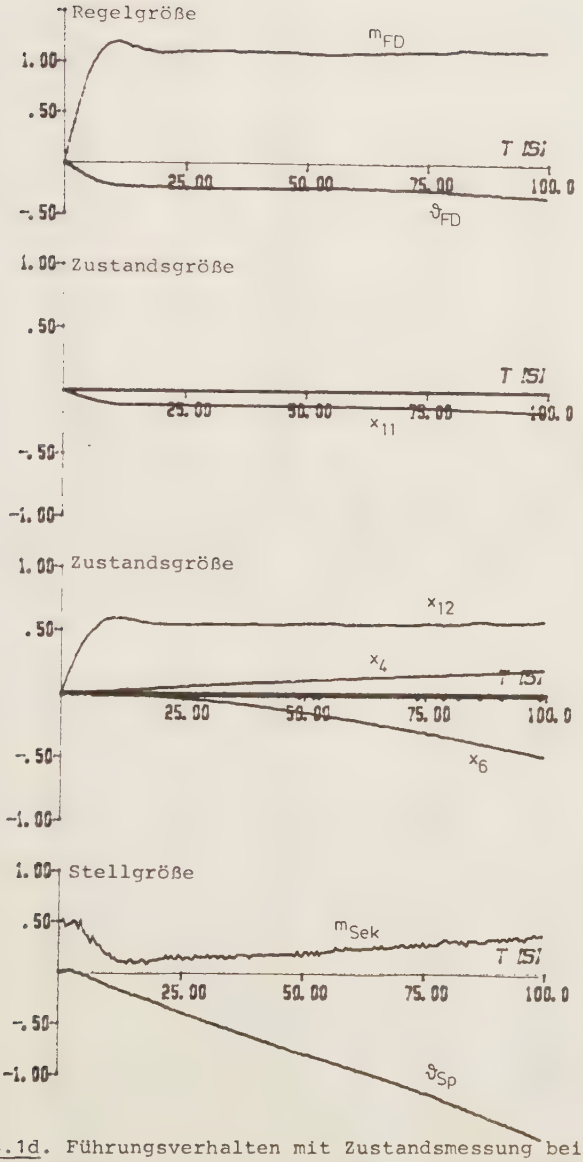



Bild S.1d. Führungsverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Sollwertänderung des Frischdampfdurchsatzes (30 % Last)

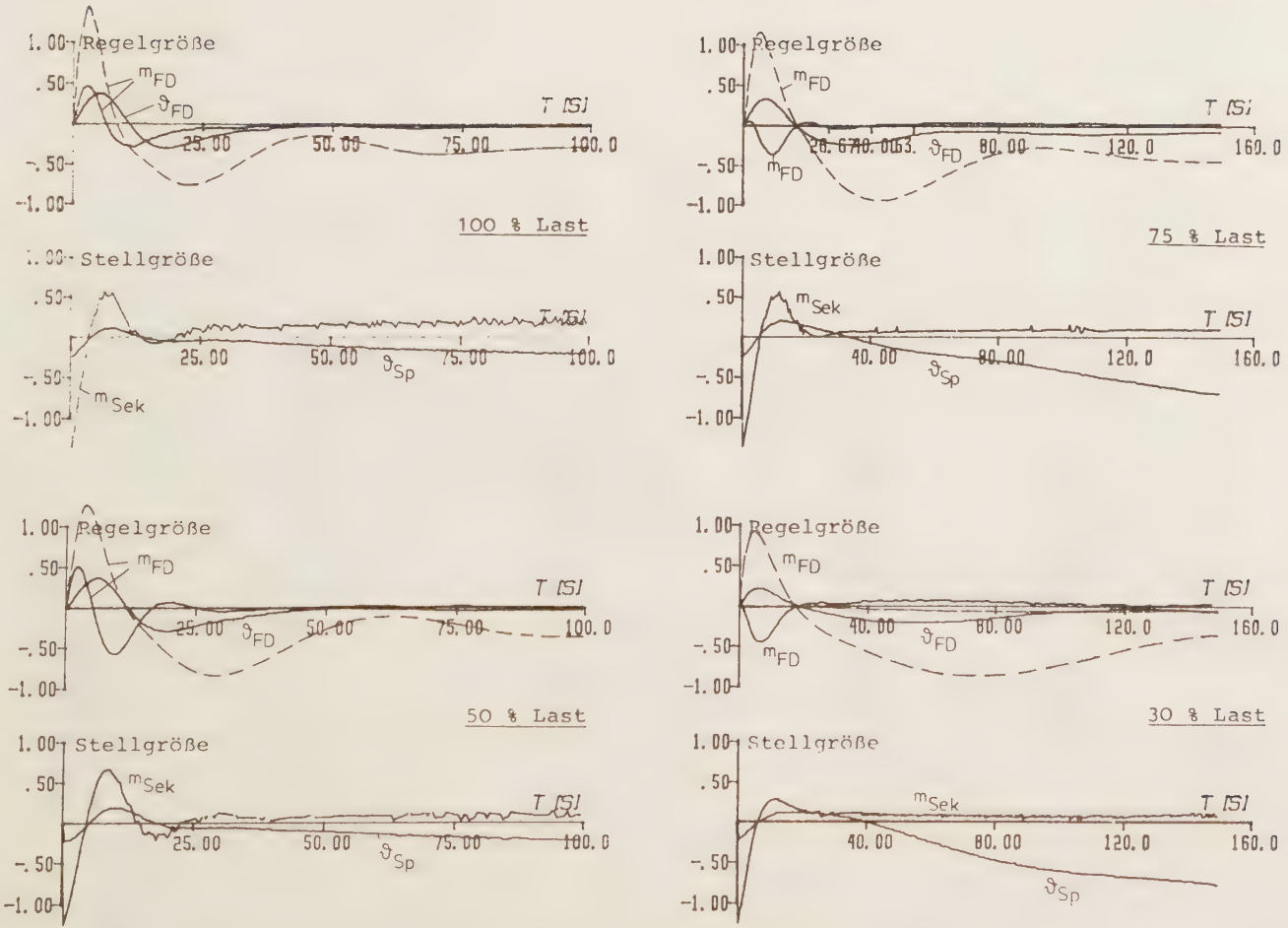



Bild S.2a. Störverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Änderung des Speisewasserdurchsatzes (———) mit und (- - -) ohne Regler

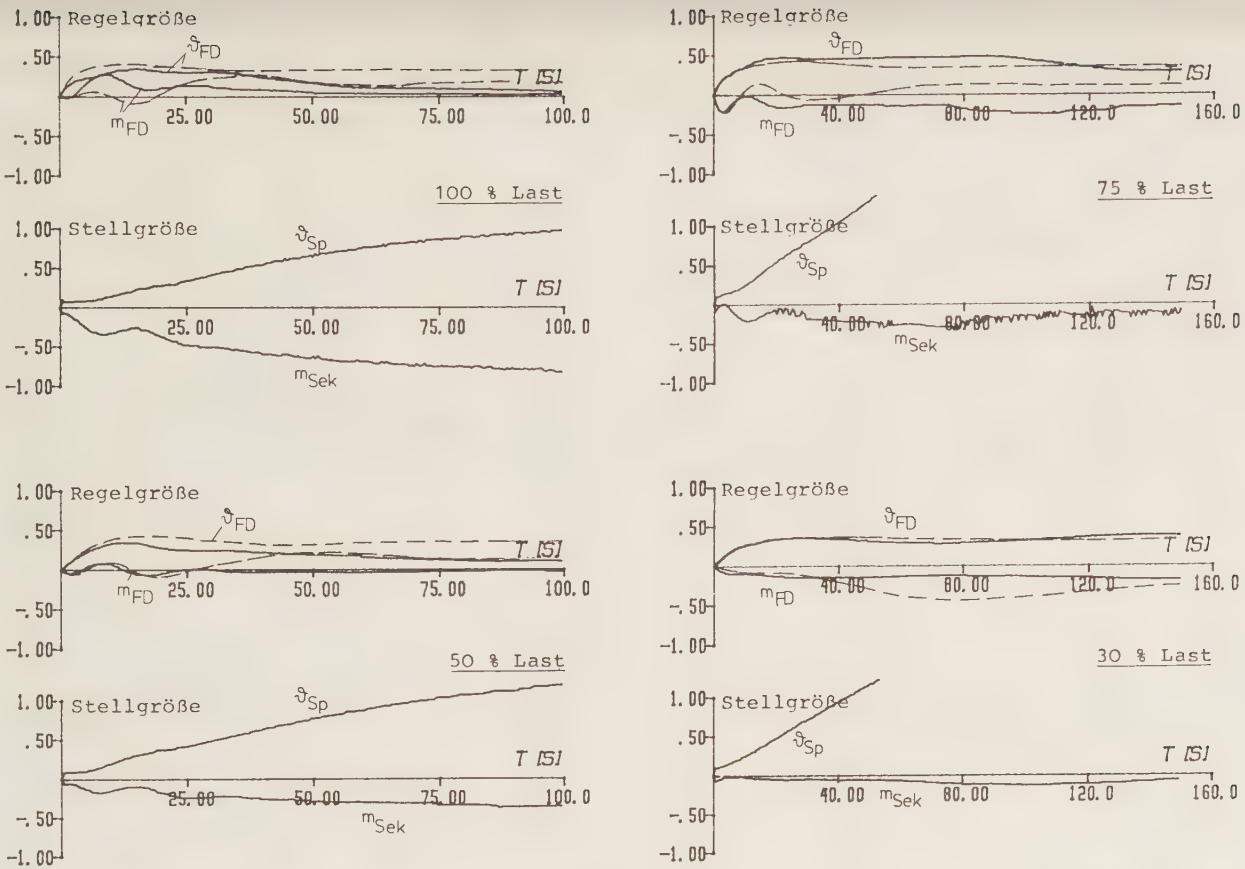



Bild S.2b. Störverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Änderung der Heizmitteleintrittstemperatur ($\vartheta_{DESekEin}$) (———) mit und (- - -) ohne Regler

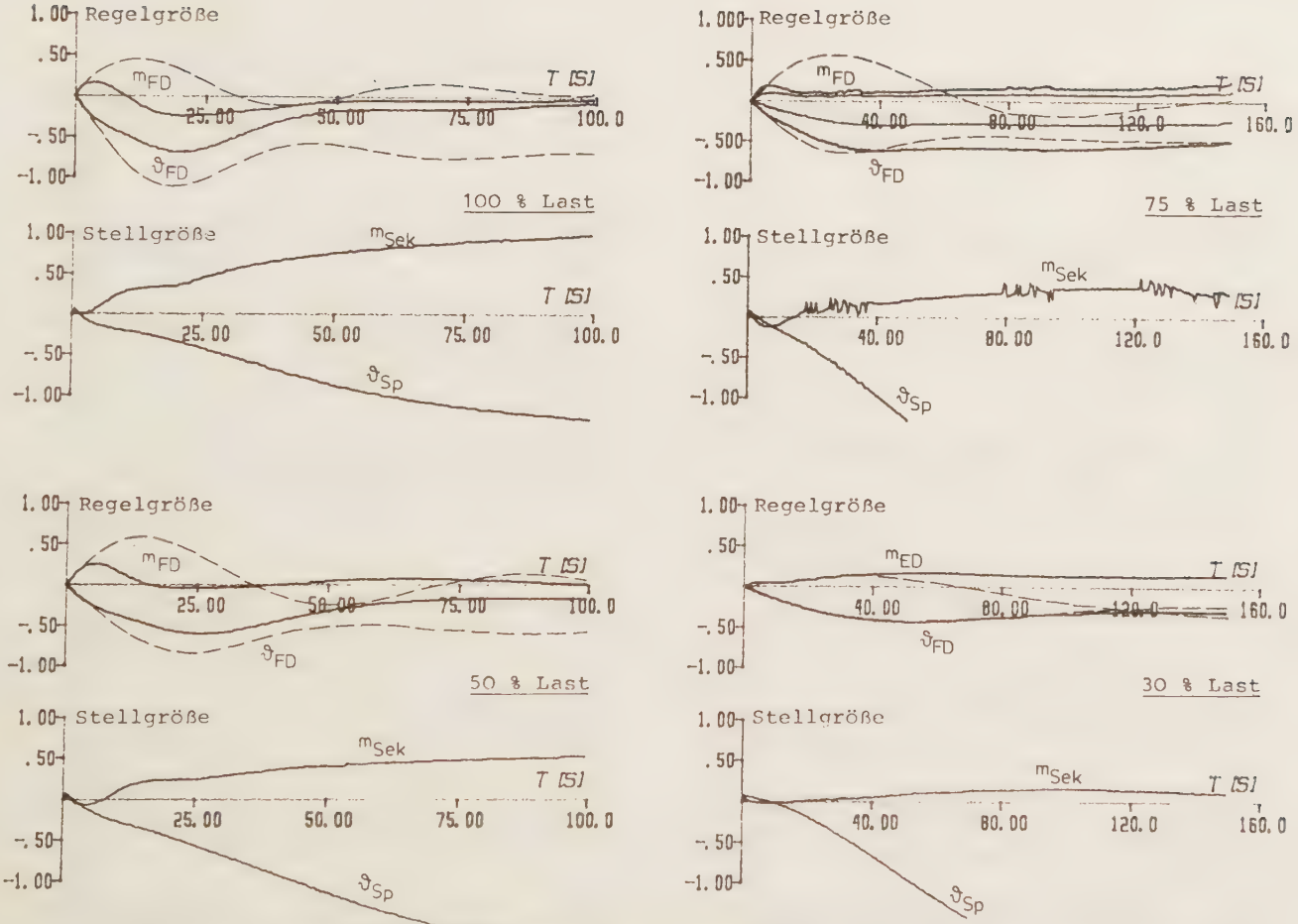



Bild S.2c. Störverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Änderung des Frischdampfdrucks (———) mit und (- - -) ohne Regler

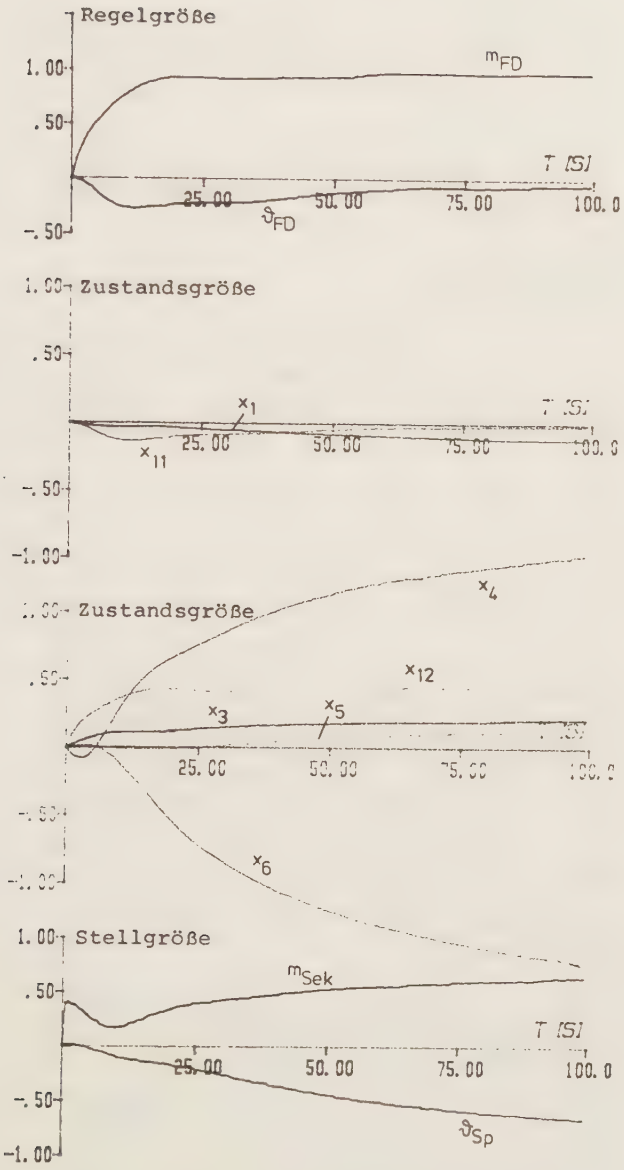



Bild S.3a. Führungsverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Sollwertänderung des Frischdampfdurchsatzes (100 % Last)

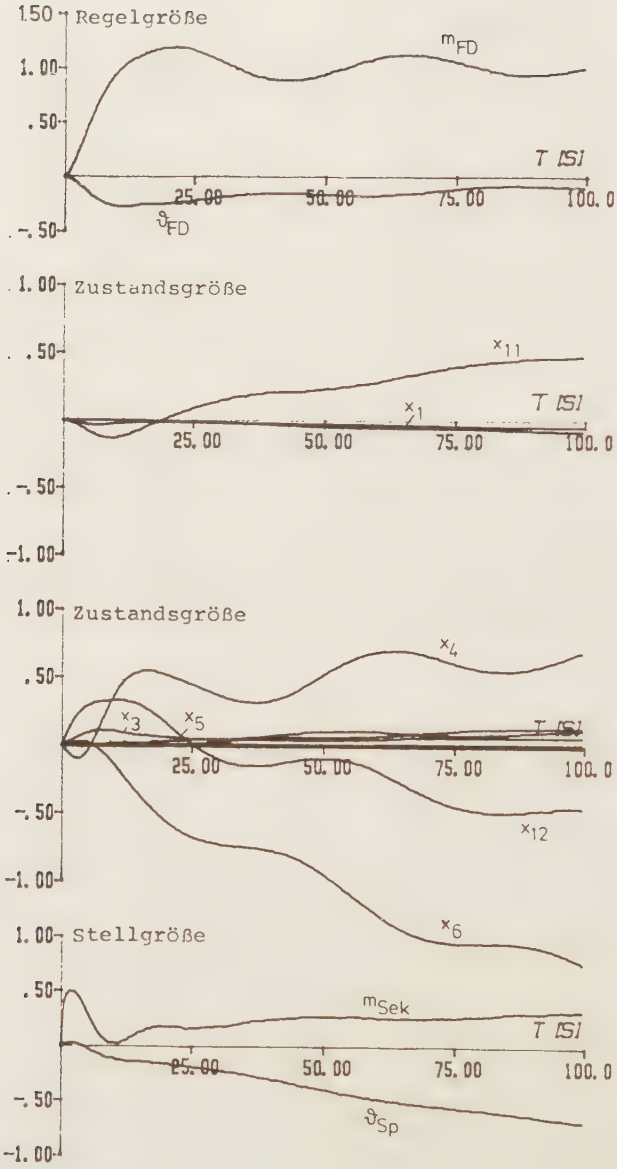



Bild S.3b. Führungsverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Sollwertänderung des Frischdampfdurchsatzes (75 % Last)

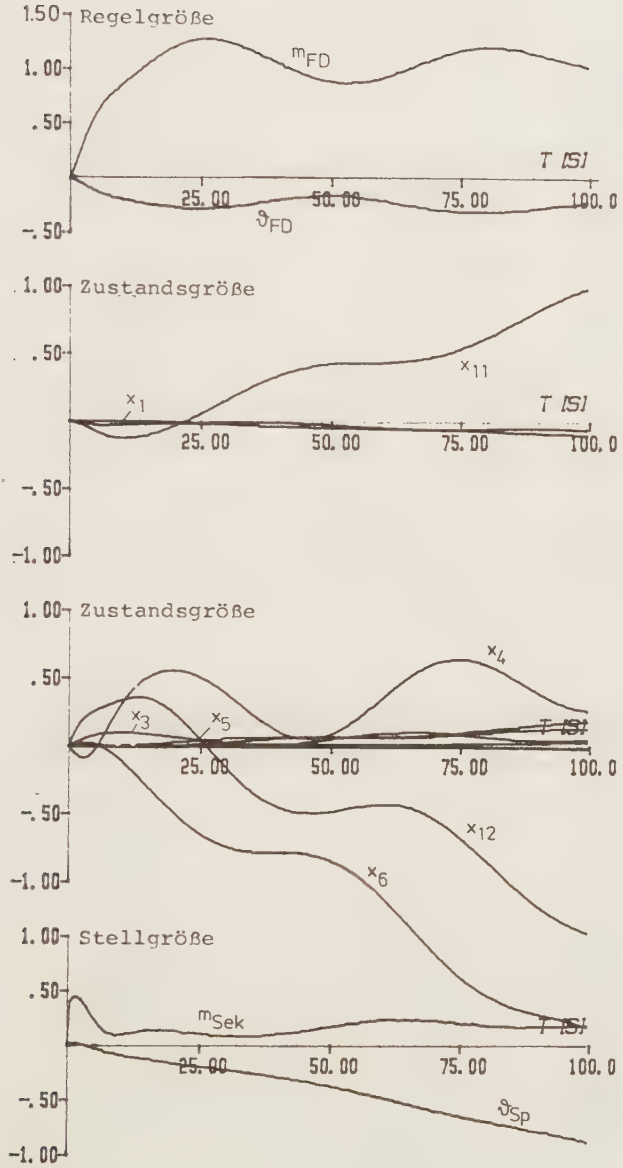



Bild S.3c. Führungsverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Sollwertänderung des Frischdampfdurchsatzes (50 % Last)

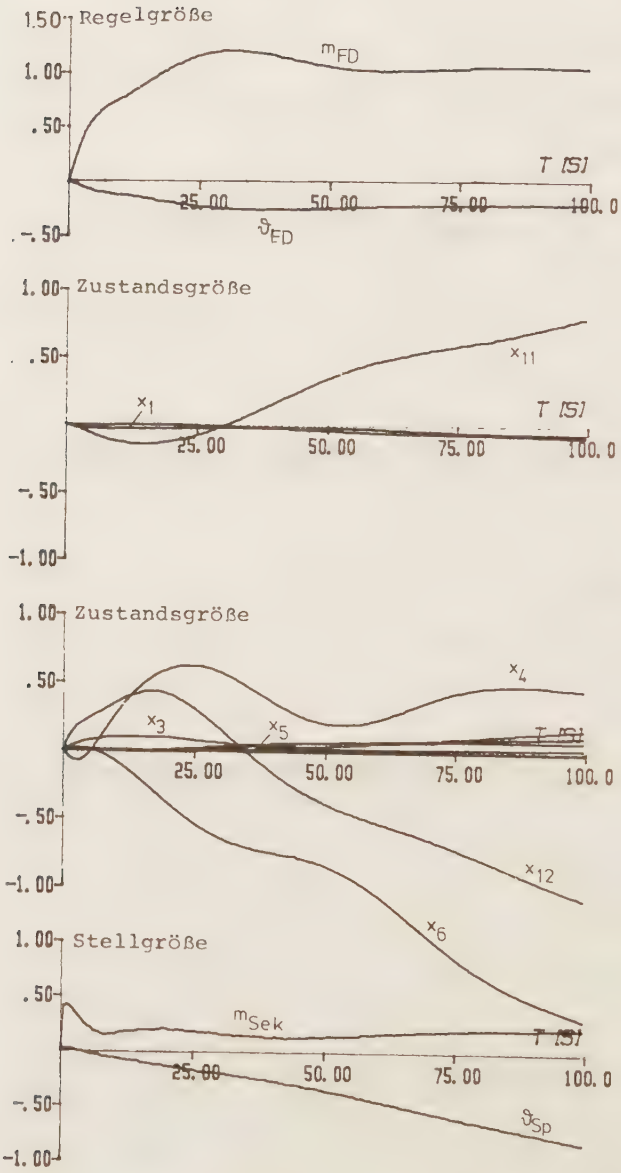



Bild S.3d. Führungsverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Sollwertänderung des Frischdampfdurchsatzes (30 % Last)

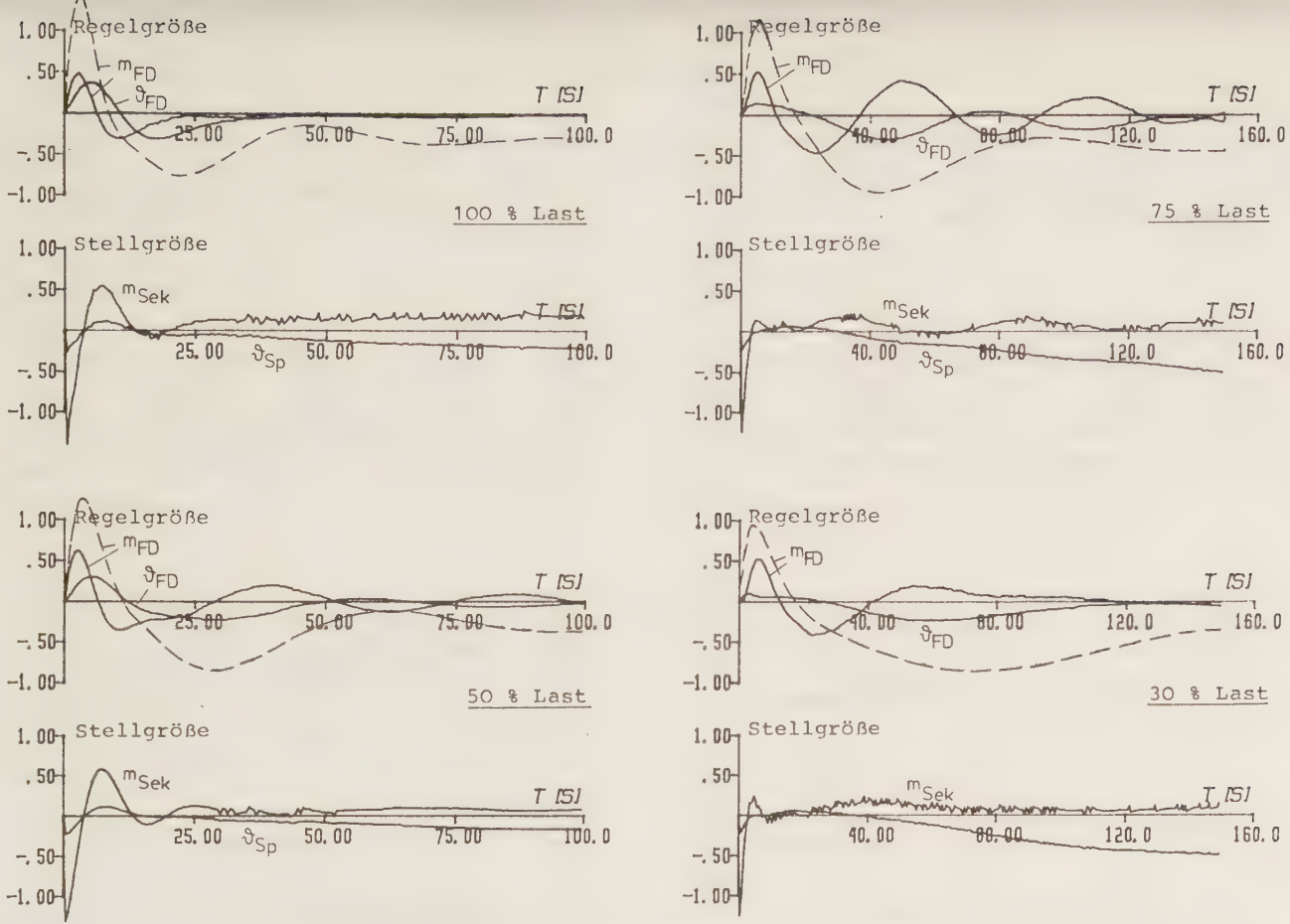



Bild S.4a. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Änderung des Speisewasserdurchsatzes (———) mit und (- - -) ohne Regler

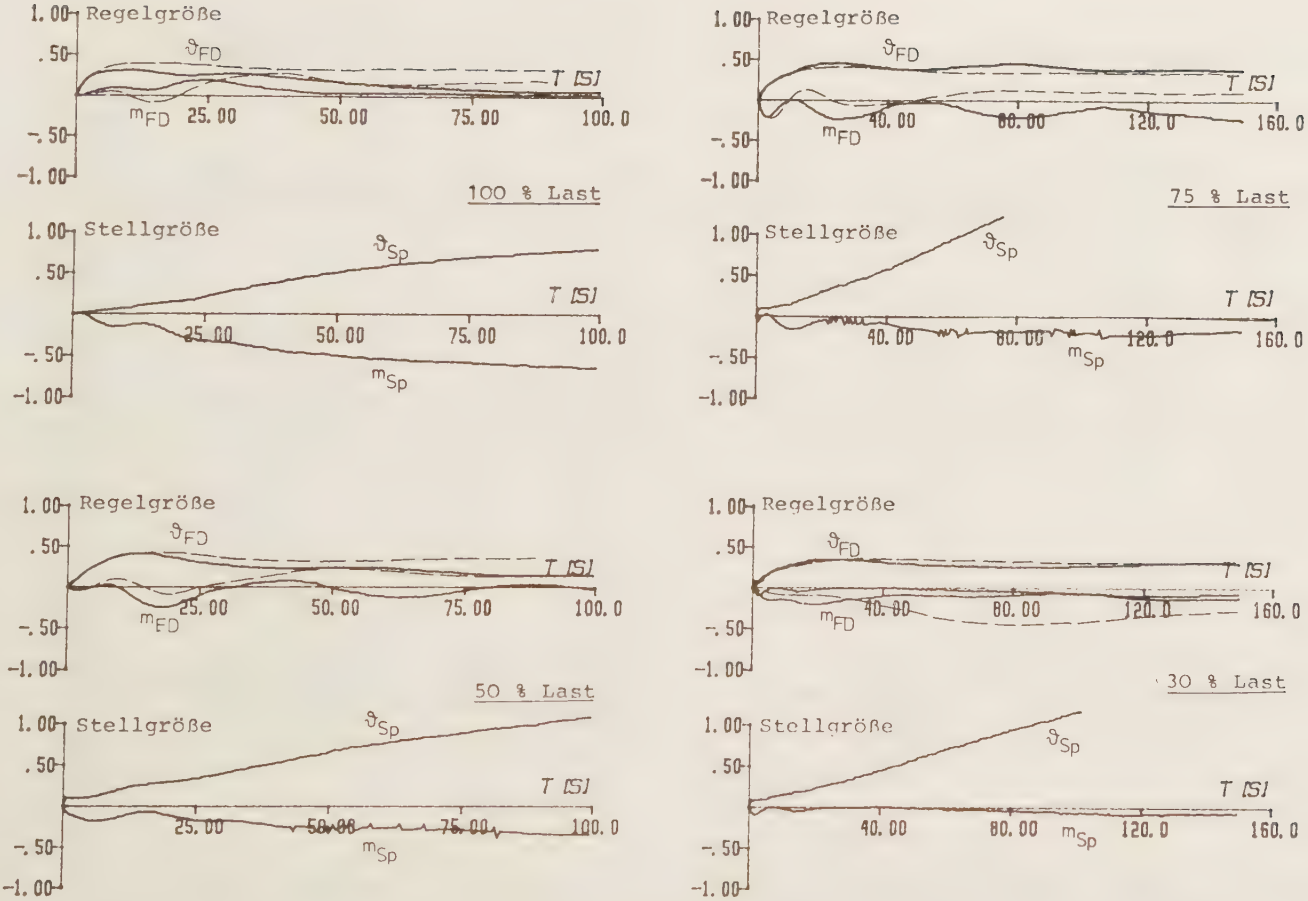



Bild S.4b. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Änderung der Heizmitteleintrittstemperatur ($\vartheta_{DESekEin}$) (———) mit und (- - -) ohne Regler

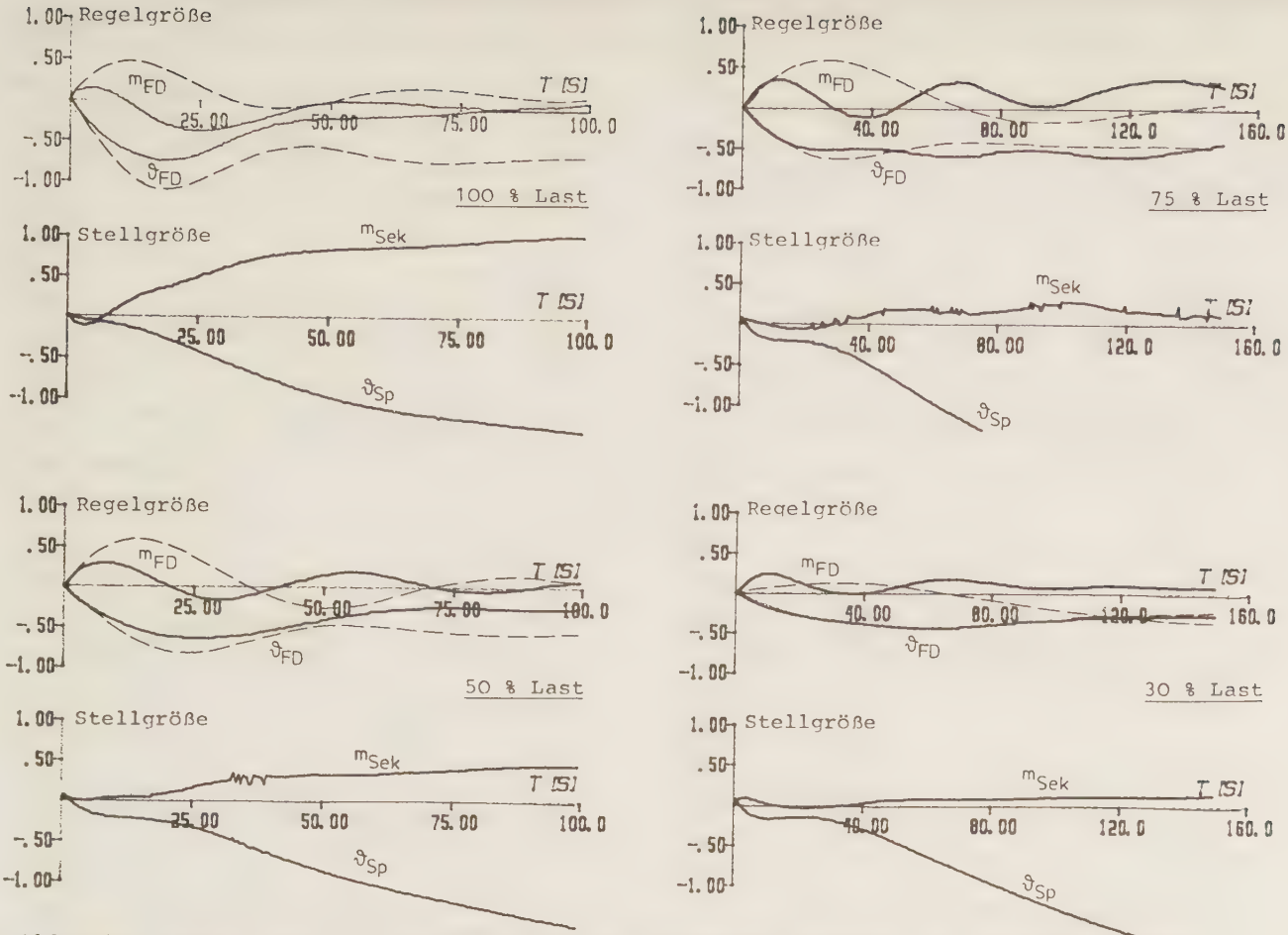



Bild S.4c. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Änderung des Frischdampfdrucks (——) mit und (- - -) ohne Regler

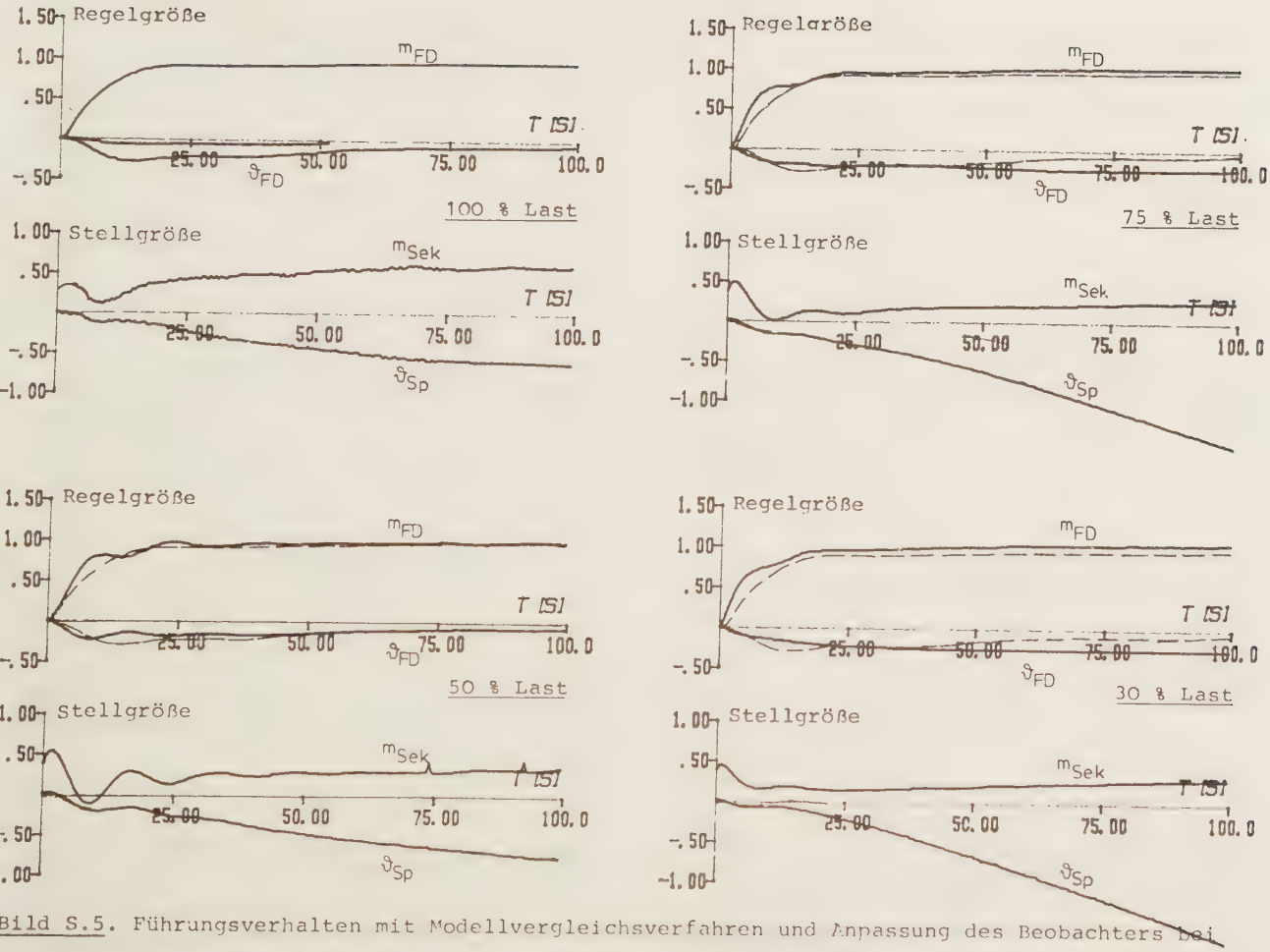



Bild S.5. Führungsverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Sollwertänderung des Frischdampfdurchsatzes (- - — Nominales Verhalten)

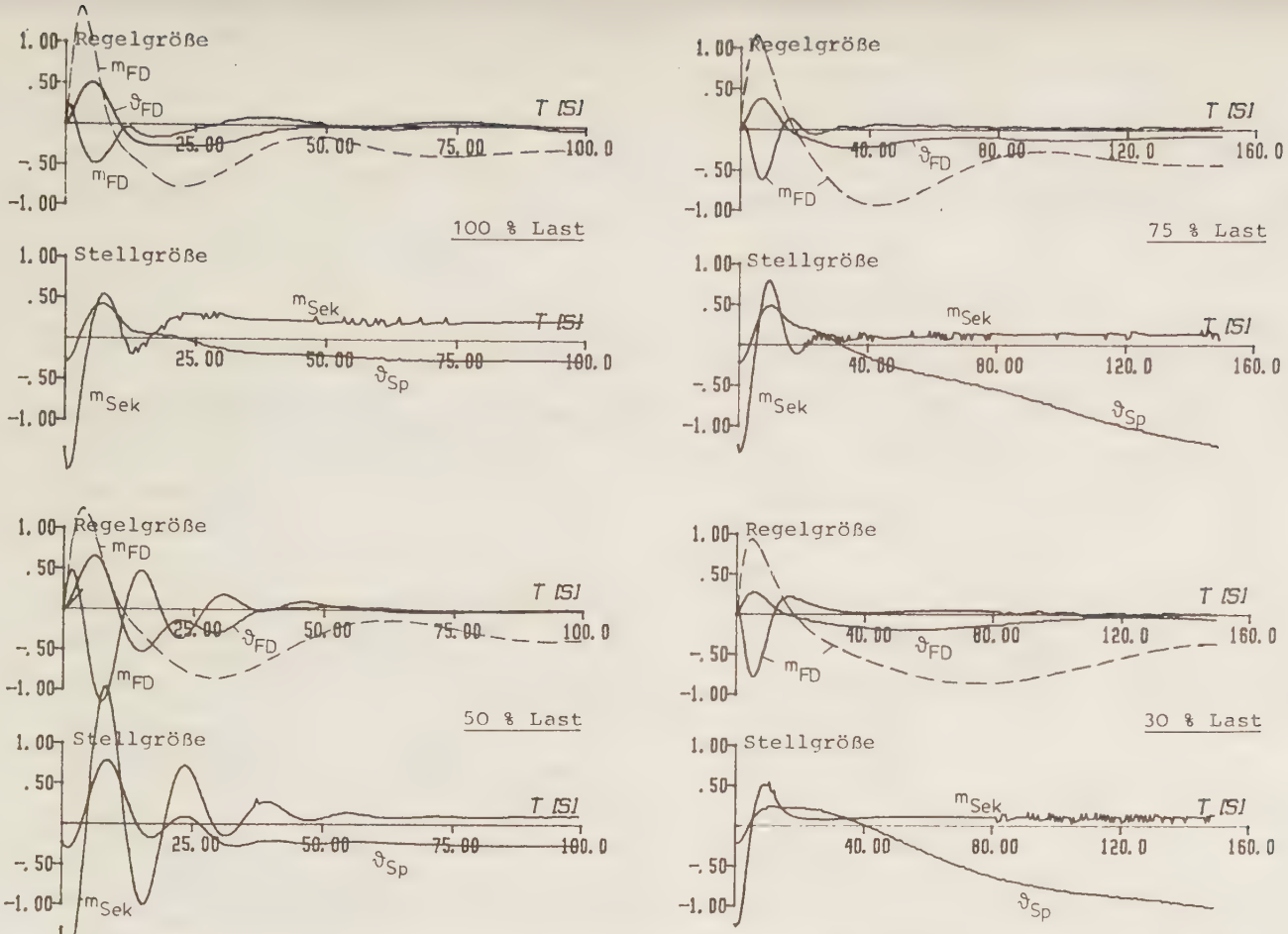



Bild V.6a. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung des Speisewasserdurchsatzes (———) mit und (- - -) ohne Regler

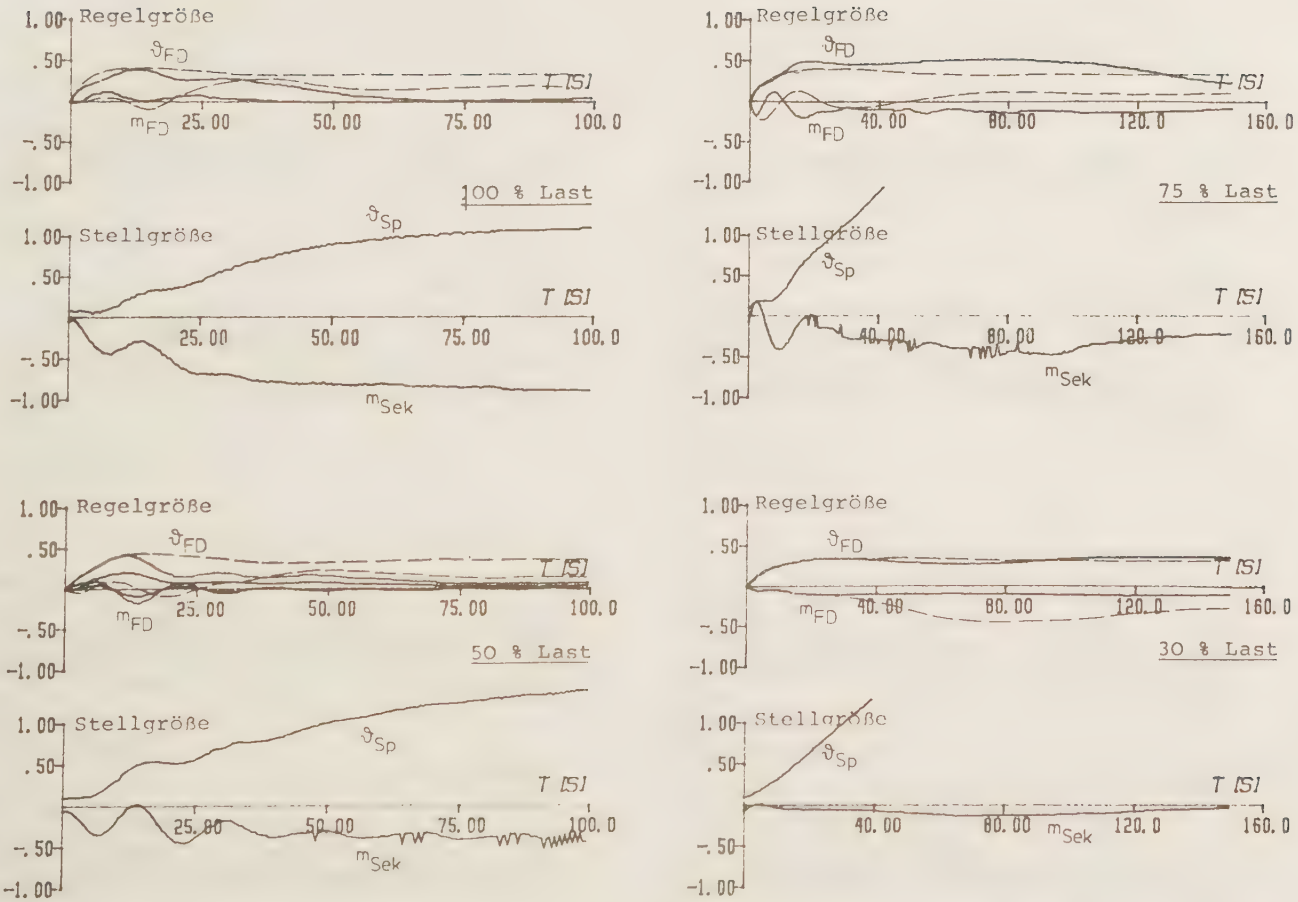



Bild S.6b. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung der Heizmitteleintrittstemperatur ($\vartheta_{DESekEin}$)
(———) mit und (- - -) ohne Regler

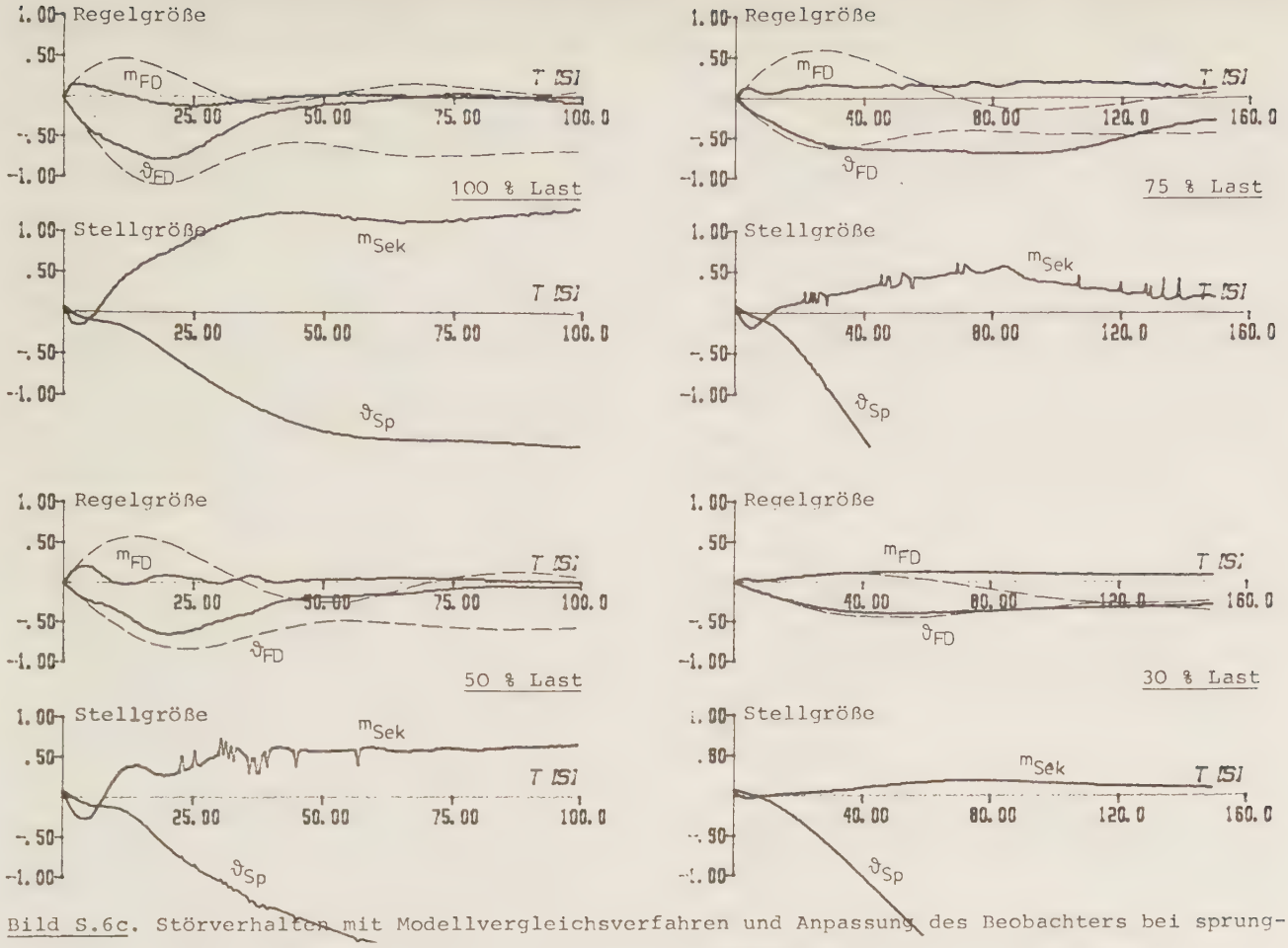



Bild S.6c. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung des Frischdampfdrucks, (———) mit und (- - -) ohne Regler

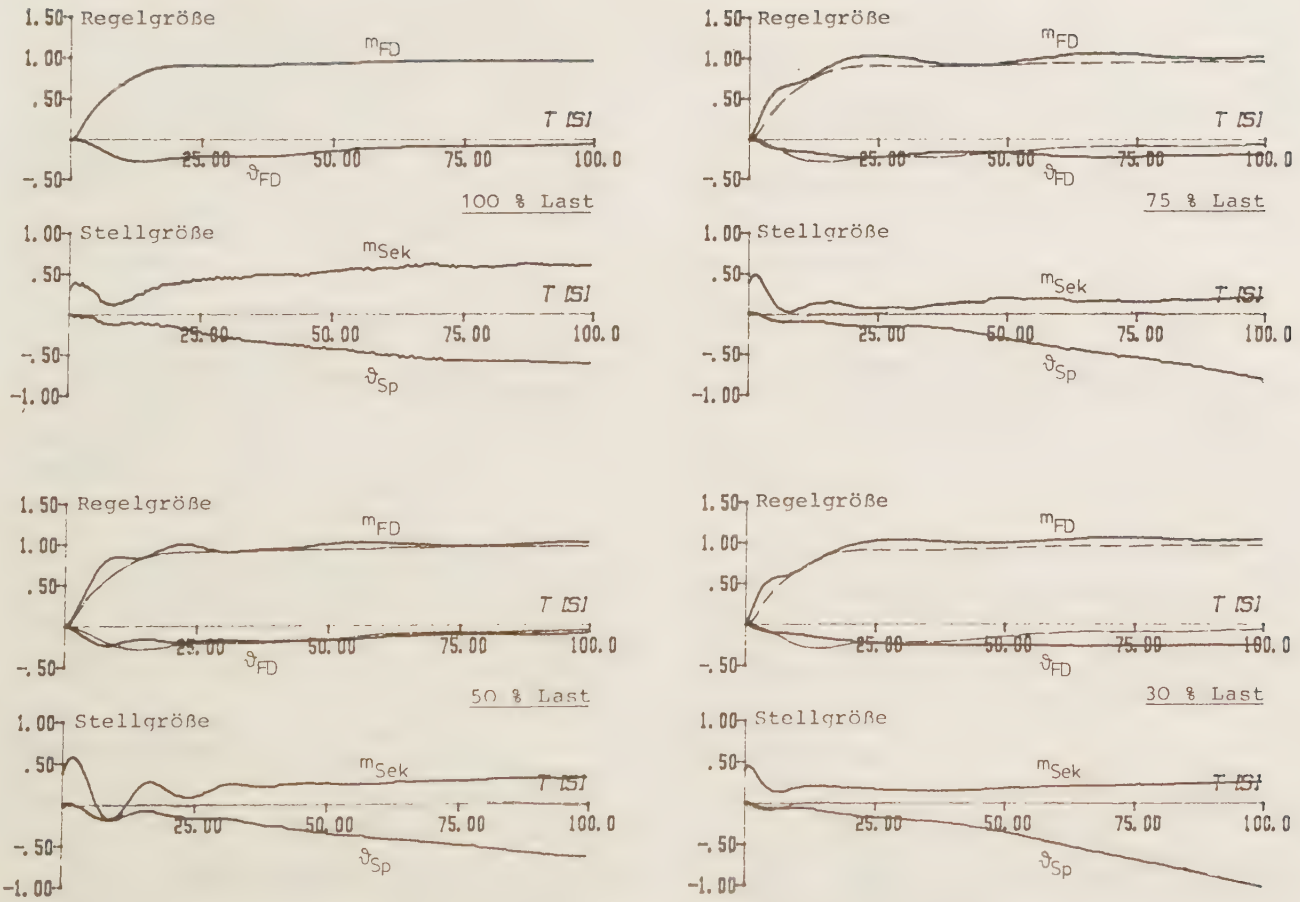



Bild S.7. Führungsverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Sollwertänderung des Frischdampfdurchsatzes, (- - - Nominales Verhalten)

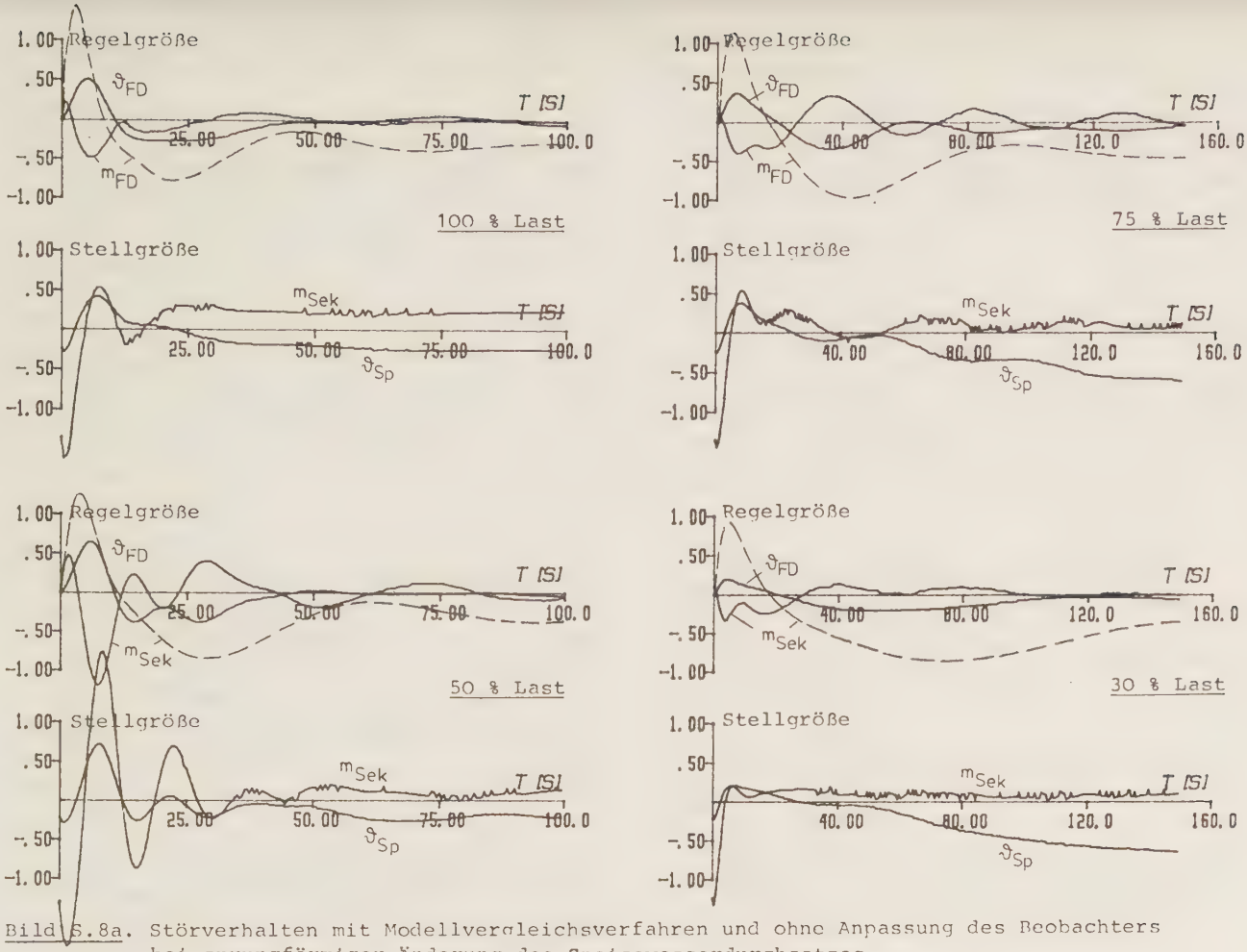



Bild 5.8a. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung des Speisewasserdurchsatzes (———) mit und (- - -) ohne Regler

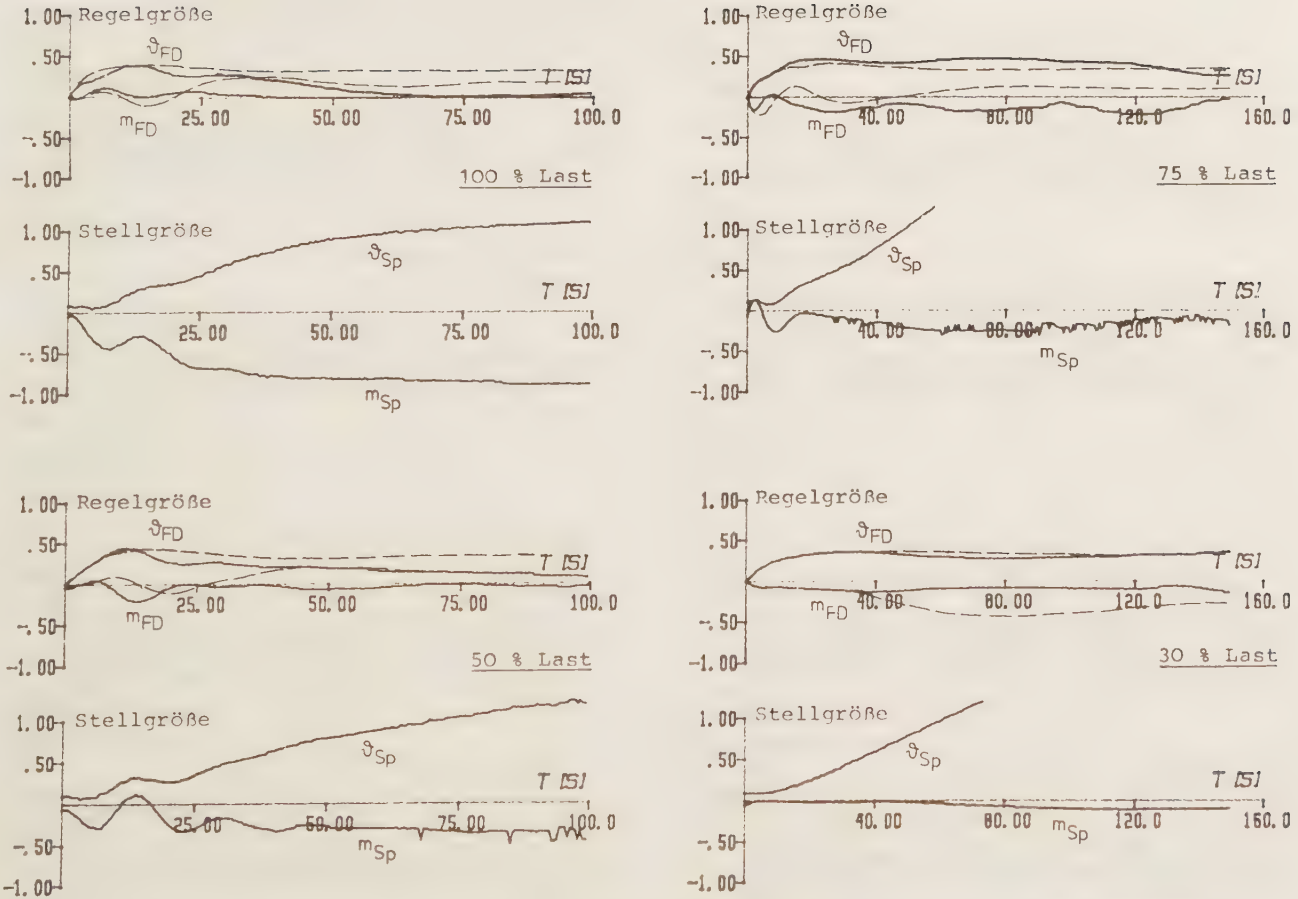



Bild S.8b. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung der Heizmitteleintrittstemperatur ($\vartheta_{DFSekEin}$) (———) mit und (- - -) ohne Regler

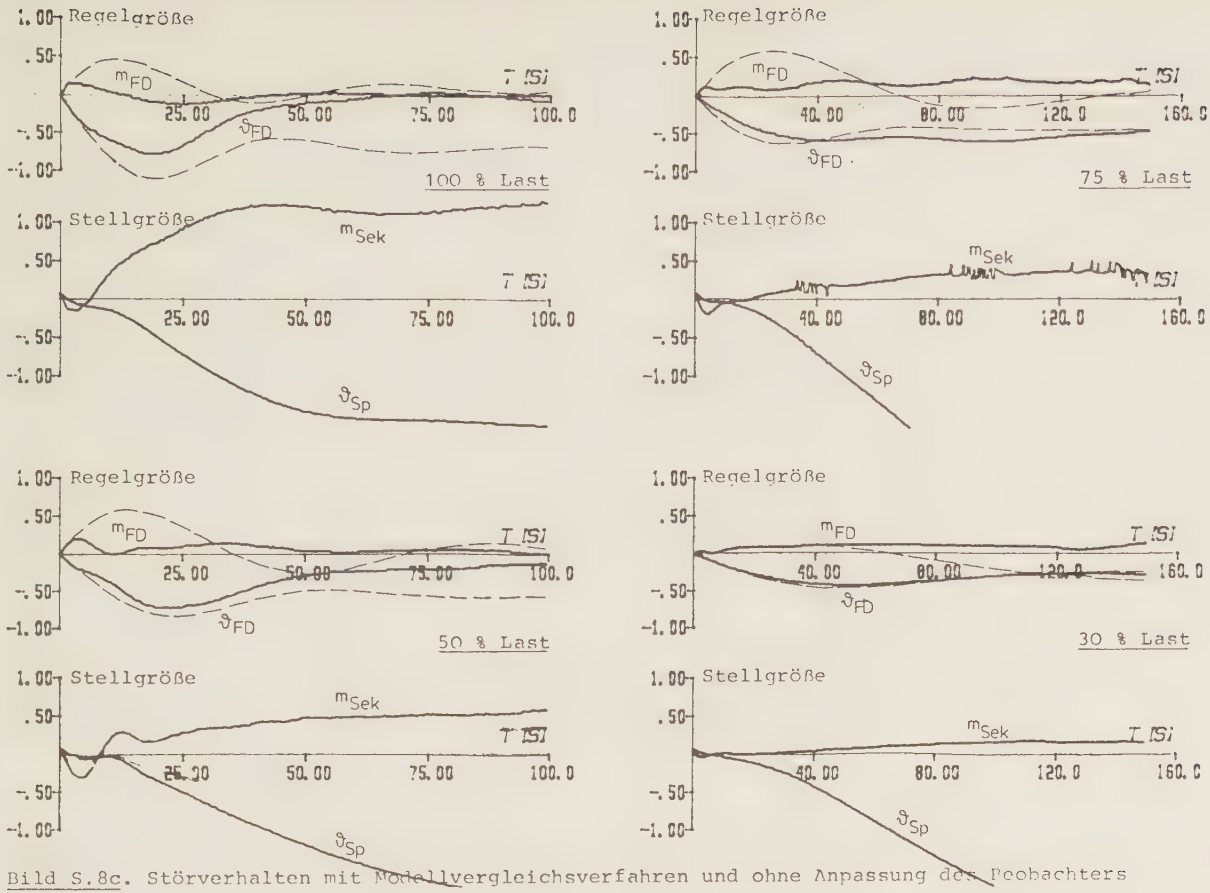



Bild S.8c. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung des Frischdampfdrucks
(———) mit und (- - -) ohne Regler

Anhang T: Optimaler Zustandsregler und Beobachter für Dampferzeugerregelung

ⓐ **PI-Zustandsregler (Nominalregler)**

```
P-RUECKFUEHRUNG:
DIMENSION  2* 2

 .108664      -.862165
 .974458E-01 -.814890E-01
ABTASTZEIT=  .500000

I-RUECKFUEHRUNG:
DIMENSION  2* 2

 .108915       .242986
-.624968E-01   .202082E-01

P-RUECKFUEHRMATRIX FUER DIE ERSTEN
  10 ZUSTANDSGROESSEN
DIMENSION  2*10

-8.35057      -.388155      -6.40871      -.268973      -5.26325      -.189139
-1.14631       .172297      -.813787       .337691
 2.84362       .497676E-01   .703420      -.125768       .480105      -.195140
-.241387      -.125204E-01  -.116179       .439517E-01

AUFSCHALTMATRIX G:
DIMENSION  2* 2

 .590766       .392273
-.309522       .194207E-01
```

ⓑ **PI-Zustandsregler**

```
P-RUECKFUEHRUNG:
DIMENSION  2* 2

-.150329      -1.17951
 .121246      -.202400
ABTASTZEIT=  .500000

I-RUECKFUEHRUNG:
DIMENSION  2* 2

  153994       .487921
-.822638E-01   .839148E-01

P-RUECKFUEHRMATRIX FUER DIE ERSTEN
  10 ZUSTANDSGROESSEN
DIMENSION  2*10

-8.99539      -.223015      -5.21666      -.269633      -5.37675      -.244389
-1.45015       .580937E-01  -1.06338       .380399
 3.71503       .706489E-01   .811083      -.186986       .887252      -.225773
-.440968      -.505090E-02  -.236970       .780630E-01

AUFSCHALTMATRIX G:
DIMENSION  2* 2

 1.30590       .797352
-.472696       .342225E-01
```

ⓒ Störgrößenaufschaltmatrix

MATRIX $\underline{F}_z$ DIMENSION 2* 3, ABTASTZEIT = 500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) |
|---|---|---|---|
| ( 1) | 2.24001 | -20.2890 | 5.99035 |
| ( 2) | -2.42653 | 26.7847 | -8.28835 |

ⓓ Beobachter für Nominalmodell

MATRIX $\underline{D}$ DIMENSION 12*12, ABTASTZEIT = 500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .998617 | .786361E-02 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | -.475298E-02 | .797368 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .997716 | -.920460E-02 | .368045E-04 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .489760 | .957862 | .198352E-03 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.999786E-04 | -.318020E-04 | .998103 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.194440E-03 | -.619531E-04 | .492248 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.205038E-03 | -.649647E-04 | -.205877E-03 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.151351E-02 | -.481379E-03 | -.151941E-02 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.216112E-02 | -.685565E-03 | -.216981E-02 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.583873E-02 | -.185624E-02 | -.586163E-02 |
| (11) | .485011 | -.161542 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .000000E+00 | .479544 | .146432 | .482378 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .125132E-04 | .359040E-04 | .698901E-05 | .337591E-04 | -.548220E-05 |
| ( 4) | .674830E-04 | .193543E-03 | .377437E-04 | .182134E-03 | -.295060E-04 |
| ( 5) | -.719357E-02 | -.973203E-04 | -.190734E-04 | -.921158E-04 | .149432E-04 |
| ( 6) | .969260 | -.130532E-03 | -.372726E-04 | -.179467E-03 | .289590E-04 |
| ( 7) | -.597495E-04 | .990417 | -.751039E-01 | -.198127E-03 | .308824E-04 |
| ( 8) | -.516657E-03 | .472485 | .890638 | -.139432E-02 | .226283E-03 |
| ( 9) | -.736044E-03 | -.211511E-02 | -.429217E-03 | .954375 | -.125555 |
| (10) | -.198235E-02 | -.571767E-02 | -.111216E-02 | .426557 | .730455 |
| (11) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .157725 | .464869 | .858377E-01 | .422702 | -.770565E-... |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.550051E-02 | .000000E+00 |
| ( 2) | -.181164E-01 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .131683E-03 |
| ( 4) | .000000E+00 | .723300E-03 |
| ( 5) | .000000E+00 | -.361572E-03 |
| ( 6) | .000000E+00 | -.734757E-03 |
| ( 7) | .000000E+00 | -.662039E-03 |
| ( 8) | .000000E+00 | -.545473E-02 |
| ( 9) | .000000E+00 | -.727210E-02 |
| (10) | .000000E+00 | -.207903E-01 |
| (11) | .940763 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .772538 |

MATRIX E DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.264430E-02 | .000000E+00 |
| ( 2) | .185085E-01 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | -.145445E-03 |
| ( 4) | .000000E+00 | -.802895E-03 |
| ( 5) | .000000E+00 | .401835E-03 |
| ( 6) | .000000E+00 | .813153E-03 |
| ( 7) | .000000E+00 | .744437E-03 |
| ( 8) | .000000E+00 | .606425E-02 |
| ( 9) | .000000E+00 | .814086E-02 |
| (10) | .000000E+00 | .231400E-01 |
| (11) | .185685E-01 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .395274E-01 |

MATRIX G DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.171641E-01 | -.153459E-01 |
| ( 2) | .278626E-04 | .173680E-02 |
| ( 3) | .431472E-01 | .269204E-04 |
| ( 4) | -.136307 | .145864E-03 |
| ( 5) | -.476767E-04 | .325876E-01 |
| ( 6) | -.928380E-04 | .362825 |
| ( 7) | -.974950E-04 | -.150694E-03 |
| ( 8) | -.721690E-03 | -.111133E-02 |
| ( 9) | -.102863E-02 | -.158780E-02 |
| (10) | -.278322E-02 | -.428768E-02 |
| (11) | -.420668E-02 | -.178487 |
| (12) | .222061 | .355695 |

MATRIX $G_z$ DIMENSION 12* 3, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) |
|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .143461E-01 | -.278946E-01 |
| ( 2) | .000000E+00 | 1.56129 | .218513E-02 |
| ( 3) | -.107273 | .439635E-02 | .132878E-04 |
| ( 4) | -.255745 | -.736599 | .716189E-04 |
| ( 5) | -.107523E-02 | .159152E-02 | .239752E-02 |
| ( 6) | -.209372E-02 | .310131E-03 | .177972 |
| ( 7) | -.219922E-02 | .437791 | -.743390E-04 |
| ( 8) | -.162769E-01 | -.538236E-02 | -.548552E-03 |
| ( 9) | .761481 | .343040E-02 | -.783449E-03 |
| (10) | 5.31482 | .923941E-02 | -.211629E-02 |
| (11) | .000000E+00 | 1.73553 | -.225244 |
| (12) | 5.00895 | -.728127 | .174439 |

ⓔ Beobachter für 75 % Last

MATRIX D DIMENSION 12*12, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .993563 | .564627E-02 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | -.194313E-02 | .912756 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .998849 | -.518579E-02 | .158370E-03 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .491844 | .967602 | -.127370E-03 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .261894E-04 | .333530E-05 | .998958 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.458820E-03 | -.584034E-04 | .494035 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.279757E-03 | -.356219E-04 | -.280719E-0 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 | .137836E-03 | .136546E-04 | .108247E-0 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | .137852E-02 | .137330E-03 | .108219E-0 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.356278E-03 | -.450521E-04 | -.357670E-0 |
| (11) | .487867 | -.502742E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .000000E+00 | .488598 | .607582E-01 | .491111 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .233177E-04 | .153896E-03 | -.400860E-05 | .146406E-03 | -.481303E-04 |
| ( 4) | -.187097E-04 | -.123566E-03 | .335723E-05 | -.117220E-03 | .387274E-04 |
| ( 5) | -.425423E-02 | .255403E-04 | -.650631E-06 | .243048E-04 | -.798579E-05 |
| ( 6) | .977640 | -.447322E-03 | .116716E-04 | -.425454E-03 | .139923E-03 |
| ( 7) | -.413346E-04 | .984024 | -.616018E-01 | -.259546E-03 | .853124E-04 |
| ( 8) | .153589E-04 | .473197 | .889091 | .991160E-04 | -.329302E-04 |
| ( 9) | .159352E-03 | .105169E-02 | -.272837E-04 | .974435 | -.101872 |
| (10) | -.523364E-04 | -.346035E-03 | .100752E-04 | .438187 | .755818 |
| (11) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+0 |
| (12) | .707785E-01 | .469805 | -.172500E-01 | .435390 | -.149694 |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.570798E-02 | .000000E+00 |
| ( 2) | -.759091E-02 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .685834E-03 |
| ( 4) | .000000E+00 | -.432203E-03 |
| ( 5) | .000000E+00 | .101937E-03 |
| ( 6) | .000000E+00 | -.174736E-02 |
| ( 7) | .000000E+00 | -.107351E-02 |
| ( 8) | .000000E+00 | .314459E-03 |
| ( 9) | .000000E+00 | .415343E-02 |
| (10) | .000000E+00 | -.962589E-03 |
| (11) | .351455 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .894015 |

MATRIX E DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | .647656E-04 | .000000E+00 |
| ( 2) | .773493E-02 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | -.637146E-03 |
| ( 4) | .000000E+00 | .456573E-03 |
| ( 5) | .000000E+00 | -.106972E-03 |
| ( 6) | .000000E+00 | .183556E-02 |
| ( 7) | .000000E+00 | .113230E-02 |
| ( 8) | .000000E+00 | -.335137E-03 |
| ( 9) | .000000E+00 | -.437079E-02 |
| (10) | .000000E+00 | .103037E-02 |
| (11) | .113163E-01 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .130645E-01 |

MATRIX G DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.111456E-01 | -.433458E-02 |
| ( 2) | .772946E-04 | .265292E-03 |
| ( 3) | .370232E-01 | .394687E-04 |
| ( 4) | -.351681E-01 | -.317656E-04 |
| ( 5) | .357693E-05 | .937025E-02 |
| ( 6) | -.627025E-04 | .123921 |
| ( 7) | -.382199E-04 | -.699590E-04 |
| ( 8) | .148308E-04 | .270179E-04 |
| ( 9) | .147332E-03 | .269631E-03 |
| (10) | -.490793E-04 | -.893051E-04 |
| (11) | -.203186E-01 | -.669764E-01 |
| (12) | .686812E-01 | .123192 |

MATRIX $G_z$ DIMENSION 12* 3, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) |
|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .360514E-02 | -.155793E-01 |
| ( 2) | .000000E+00 | .750137 | .535116E-03 |
| ( 3) | -.653205E-01 | -.103943E-01 | .570131E-04 |
| ( 4) | -.293166 | -.469950 | -.458533E-04 |
| ( 5) | .183721E-03 | -.477154E-04 | -.375209E-03 |
| ( 6) | -.330507E-02 | .835222E-03 | .177853 |
| ( 7) | -.201571E-02 | .402216 | -.101059E-03 |
| ( 8) | .773787E-03 | -.389238 | .399689E-04 |
| ( 9) | .942767 | -.195443E-02 | .339586E-03 |
| (10) | 3.77125 | .641053E-03 | -.128751E-03 |
| (11) | .000000E+00 | .957792 | -.135653 |
| (12) | 3.45727 | -.853092 | .176800 |

ⓕ Beobachter für 50 % Last

MATRIX D DIMENSION 12*12, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | 999113 | .372391E-02 | 000000E+00 | 000000E+00 | .300000E+00 |
| ( 2) | - 727472E-02 | .826957 | .000000E+00 | 000000E+00 | 000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .939341 | - 260194E-02 | -.599734E-05 |
| ( 4) | .000000E+00 | 000000E+00 | 492016 | 972948 | -.125389E-02 |
| ( 5) | 000000E+00 | 000000E+00 | .404755E-04 | 122410E-05 | 999553 |
| ( 6) | .000000E+00 | 000000E+00 | -.651833E-03 | -.197096E-04 | .494932 |
| ( 7) | .000000E+00 | 000000E+00 | -.304427E-03 | - 920292E-05 | -.305385E-03 |
| ( 8) | .000000E+00 | 000000E+00 | -.726174E-03 | -.219561E-04 | - 728425E-03 |
| ( 9) | .000000E+00 | 000000E+00 | -.167172E-02 | - 505037E-04 | -.167705E-02 |
| (10) | .000000E+00 | 000000E+00 | -.523641E-02 | -.159321E-03 | -.530301E-02 |
| (11) | .482553 | -.136324 | 000000E+00 | 000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .000000E+00 | .453636 | .143058E-01 | 485971 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .002903E+00 | .000033E+02 | .030030E+03 | .000300E+00 | .000003E-00 |
| ( 2) | .000003E+00 | .000033E+02 | .000030E+03 | .000300E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | - 292207E-06 | - 575440E-05 | .104034E-05 | -.556234E-05 | .218062E-05 |
| ( 4) | -.614045E-04 | - 121208E-02 | .218232E-03 | -.117144E-02 | .457973E-03 |
| ( 5) | - 154294E-02 | .330952E-04 | -.703941E-05 | .377928E-04 | -.147713E-04 |
| ( 6) | .982235 | -.629553E-03 | .113391E-03 | -.608409E-03 | .237887E-03 |
| ( 7) | - 143935E-04 | 990459 | - 350632E-01 | .234351E-03 | .111889E-03 |
| ( 8) | -.355381E-04 | 467278 | 871758 | -.678268E-03 | .265023E-03 |
| ( 9) | - 817603E-04 | -.161342E-02 | .290912E-03 | 978754 | -.750083E-01 |
| (10) | -.258640E-03 | -.510508E-02 | .919576E-03 | .439381 | .781212 |
| (11) | .002000E+00 | .000030E+02 | .000000E+00 | .000300E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .234077E-01 | .458723 | -.850915E-01 | .435368 | -.175610 |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.352603E-02 | .000000E+00 |
| ( 2) | -.276905E-01 | .000030E+00 |
| ( 3) | .000003E+00 | -.212457E-04 |
| ( 4) | .000003E+00 | -.490534E-02 |
| ( 5) | .000003E+00 | .159574E-03 |
| ( 6) | .000003E+00 | -.253778E-02 |
| ( 7) | .000003E+00 | - 117595E-02 |
| ( 8) | .000003E+00 | -.238853E-02 |
| ( 9) | .000003E+00 | -.625305E-02 |
| (10) | .000003E+00 | -.204946E-01 |
| (11) | .931465 | .000030E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .921072 |

MATRIX E DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.217313E-03 | .000000E+00 |
| ( 2) | .282222E-01 | .000030E+00 |
| ( 3) | .000003E+00 | .217511E-04 |
| ( 4) | .002003E+00 | .591206E-02 |
| ( 5) | .000003E+00 | -.162397E-03 |
| ( 6) | .000003E+00 | .259231E-02 |
| ( 7) | .000003E+00 | .120170E-02 |
| ( 8) | .000003E+00 | .295084E-02 |
| ( 9) | .000003E+00 | .540440E-02 |
| (10) | .000003E+00 | .209415E-01 |
| (11) | .327642E-01 | .000000E+00 |
| (12) | .002003E+00 | .331238E-01 |

MATRIX G DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | - 606575E-02 | - 725270E-03 |
| ( 2) | .381399E-03 | .213095E-03 |
| ( 3) | 153193E-01 | - 575042E-05 |
| ( 4) | .355035E-02 | -.141887E-03 |
| ( 5) | .113475E-04 | 995915E-03 |
| ( 6) | -.192437E-03 | .559631E-01 |
| ( 7) | - 893713E-04 | - 344201E-04 |
| ( 8) | - 214333E-03 | -.823974E-04 |
| ( 9) | - 493615E-03 | -.139031E-03 |
| (10) | - 155063E-02 | -.597701E-03 |
| (11) | - 259265E-01 | - 145602E-01 |
| (12) | 143725 | .542531E-01 |

MATRIX $G_z$, DIMENSION 12* 3, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) |
|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .112338E-01 | -.790459E-02 |
| ( 2) | .000000E+00 | 1.05710 | .143044E-02 |
| ( 3) | -.376282E-01 | -.101435E-01 | -.134940E-05 |
| ( 4) | -.311372 | -.313352 | -.283250E-03 |
| ( 5) | .193360E-03 | -.159811E-03 | -.780258E-04 |
| ( 6) | -.311393E-02 | .257303E-02 | .111350 |
| ( 7) | -.145413E-02 | .305439 | -.687116E-04 |
| ( 8) | -.346931E-02 | -1.57599 | -.163896E-03 |
| ( 9) | .878419 | .659209E-02 | -.377339E-03 |
| (10) | 2.61873 | .208639E-01 | -.119318E-02 |
| (11) | .000000E+00 | 1.21408 | -.960450E-01 |
| (12) | 2.29380 | -1.85935 | .109343 |

⑨ **Beobachter für 30 % Last**

MATRIX $D$, DIMENSION 12*12, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .999795 | .794756E-03 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | -.696116E-02 | .932974 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .998059 | -.977241E-03 | -.171643E-02 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .594626 | .999150 | .959091E-01 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.212391E-02 | -.183206E-03 | .997797 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.127717 | -.638527E-02 | .378431 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.247125E-04 | -.120071E-05 | -.246923E-04 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.403843E-03 | -.196240E-04 | -.403515E-03 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.498930E-04 | -.242442E-05 | -.498581E-04 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.213656E-03 | -.183309E-04 | -.213481E-03 |
| (11) | .487824 | -.487258E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .000000E+00 | .456172 | .224523E-01 | .465503 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | -.752969E-04 | -.169679E-02 | -.419157E-04 | -.130082E-02 | -.504293E-03 |
| ( 4) | .420703E-02 | .943059E-01 | -.234055E-03 | .994143E-01 | -.337441E-01 |
| ( 5) | -.414025E-03 | -.209776E-01 | -.518670E-04 | -.197841E-02 | -.746339E-03 |
| ( 6) | .925562 | -.125148 | -.312457E-02 | -.118962 | .449021E-01 |
| ( 7) | -.103704E-05 | .998526 | -.258082E-06 | -.230869E-04 | .860480E-05 |
| ( 8) | -.177004E-24 | .489105 | .957910 | -.376197E-03 | .141973E-03 |
| ( 9) | -.218602E-05 | -.492830E-04 | .122146E-05 | .934137 | -.224164E-01 |
| (10) | -.936357E-05 | -.211003E-03 | .522994E-05 | .448479 | .800127 |
| (11) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .202915E-01 | .457454 | -.117515E-01 | .418423 | -.158977 |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.313410E-03 | .000000E+00 |
| ( 2) | -.272933E-01 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | -.668641E-02 |
| ( 4) | .000000E+00 | .369410 |
| ( 5) | .000000E+00 | -.815652E-02 |
| ( 6) | .000000E+00 | -.492815 |
| ( 7) | .000000E+00 | -.937085E-04 |
| ( 8) | .000000E+00 | -.155503E-02 |
| ( 9) | .000000E+00 | -.133943E-02 |
| (10) | .000000E+00 | -.810851E-03 |
| (11) | .951863 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .944215 |

MATRIX **E** DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | .244994E-04 | .000000E+00 |
| ( 2) | .275485E-01 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000003E+00 | .678864E-02 |
| ( 4) | .300003E+00 | -.375122 |
| ( 5) | .000003E+00 | .829301E-02 |
| ( 6) | .000003E+00 | .500415 |
| ( 7) | .000003E+00 | .951739E-04 |
| ( 8) | .000000E+00 | .157906E-02 |
| ( 9) | .000000E+00 | .191909E-03 |
| (10) | .000000E+00 | .822764E-03 |
| (11) | .301811E-01 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .128163 |

MATRIX **G** DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.636178E-03 | -.230153E-04 |
| ( 2) | .440075E-03 | .689742E-04 |
| ( 3) | .156155E-02 | -.514948E-04 |
| ( 4) | .409981E-01 | .287739E-02 |
| ( 5) | -.894547E-03 | -.625534E-04 |
| ( 6) | -.537923E-01 | .111136E-01 |
| ( 7) | -.104079E-04 | -.740797E-06 |
| ( 8) | -.178091E-03 | -.121059E-04 |
| ( 9) | -.210154E-04 | -.149530E-05 |
| (10) | -.899834E-04 | -.640469E-05 |
| (11) | -.308925E-01 | -.483562E-02 |
| (12) | .195697 | .139689E-01 |

MATRIX $\underline{G}_z$ DIMENSION 12* 3, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) |
|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .111374E-02 | - 8784575-03 |
| ( 2) | .000003E+00 | 545031 | 6236075-03 |
| ( 3) | - 1.29533E-01 | - 8.93575E-03 | - 1.03936E-03 |
| ( 4) | .510280 | -.772518E-01 | .575455E-02 |
| ( 5) | -.124535E-01 | .468250E-03 | -.132152E-03 |
| ( 6) | -.743963 | .231593E-01 | 2222595-01 |
| ( 7) | - 1.44832E-03 | .176535E-01 | -.148154E-05 |
| ( 8) | - 2.36805E-02 | -.515278E-01 | -.242109E-04 |
| ( 9) | - 1.61315E-01 | .109937E-04 | -.299149E-05 |
| (10) | 2.87527 | .470949E-04 | -.128059E-04 |
| (11) | .000003E+00 | .575154 | -.441248E-01 |
| (12) | 2.63352 | -.101147 | .279352E-01 |

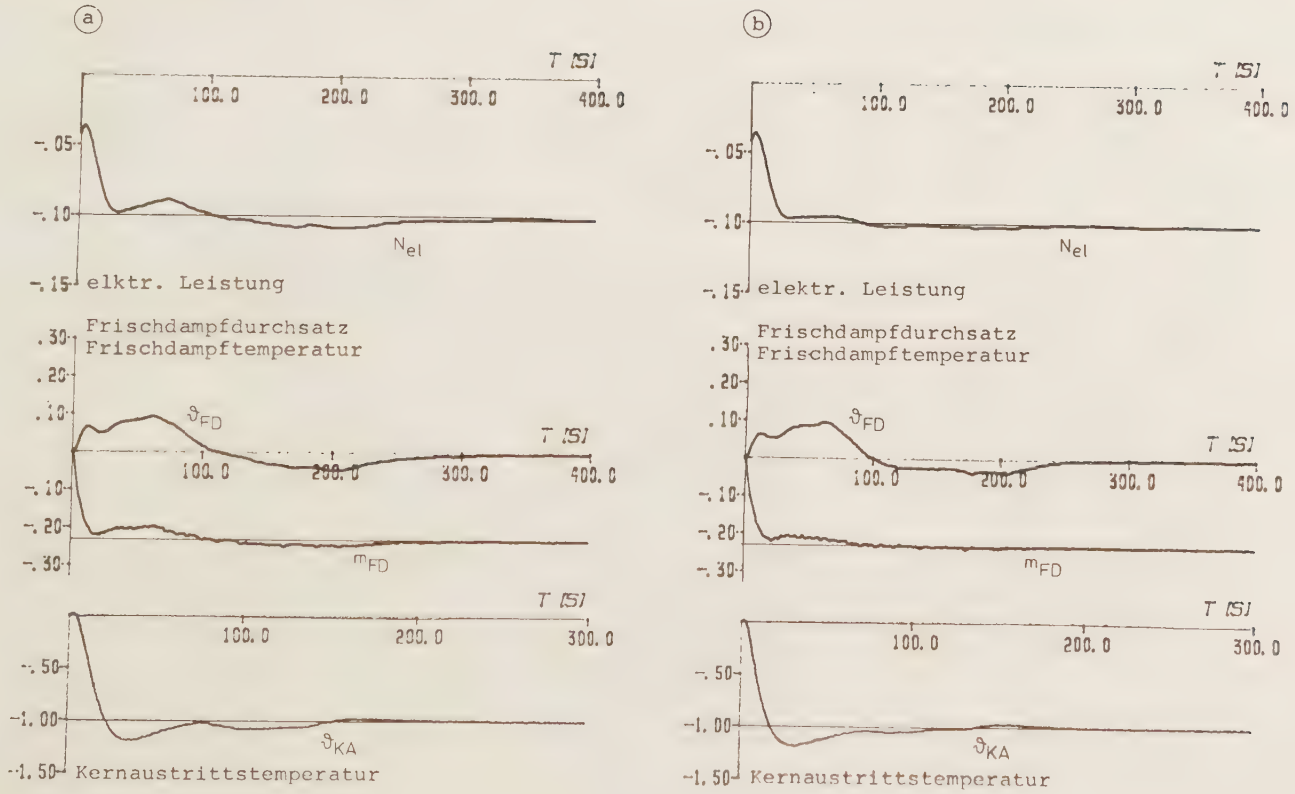



Bild U.1. Regelverhalten der gesamten Anlage bei sprungförmiger Sollwertänderung der elektrischen Leistung (100 % Last), (a) ohne und (b) mit Modellvergleichsverfahren

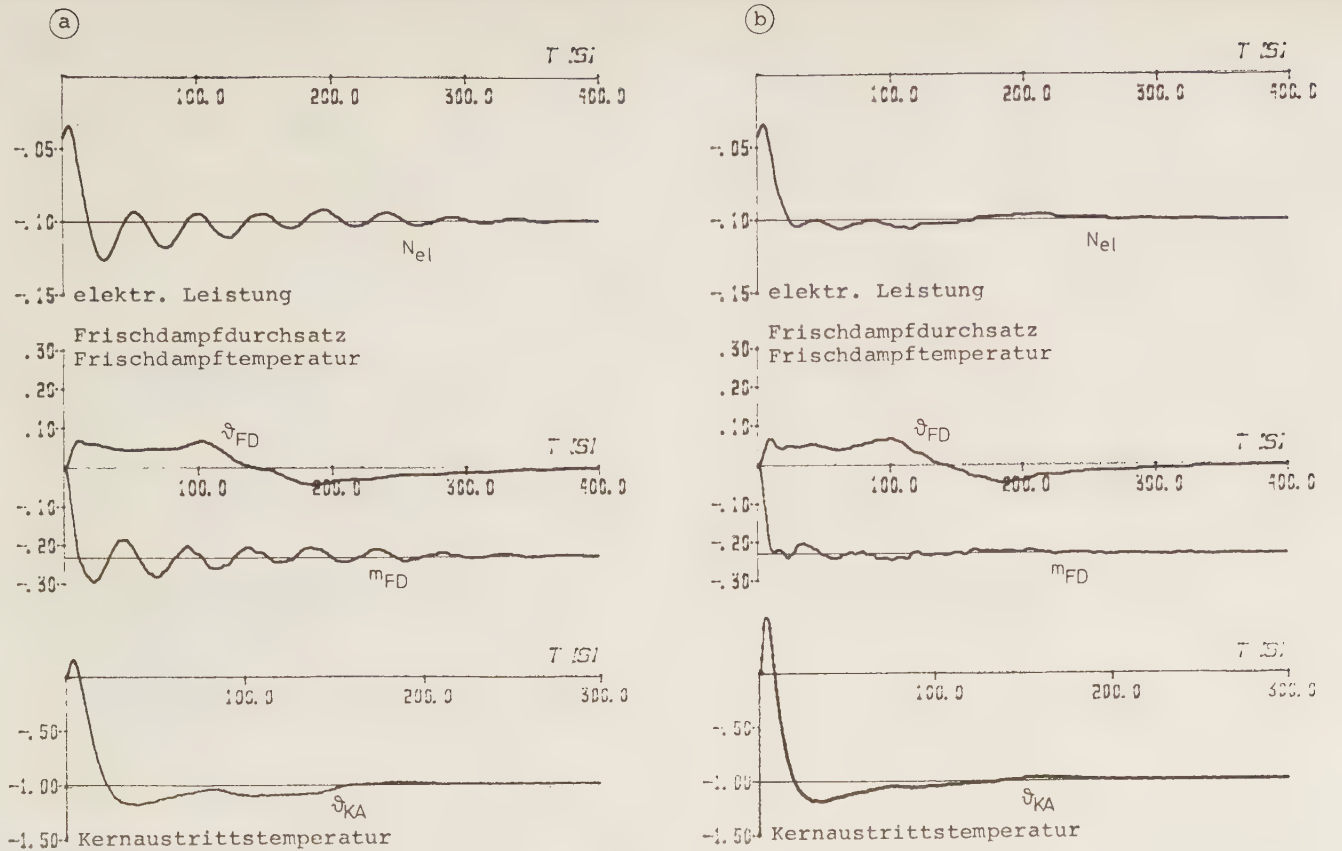



Bild U.2a. Regelverhalten der gesamten Anlage bei sprungförmiger Sollwertänderung der elektrischen Leistung (75 % Last), ⓐ ohne und ⓑ mit Anpassung des Beobachters

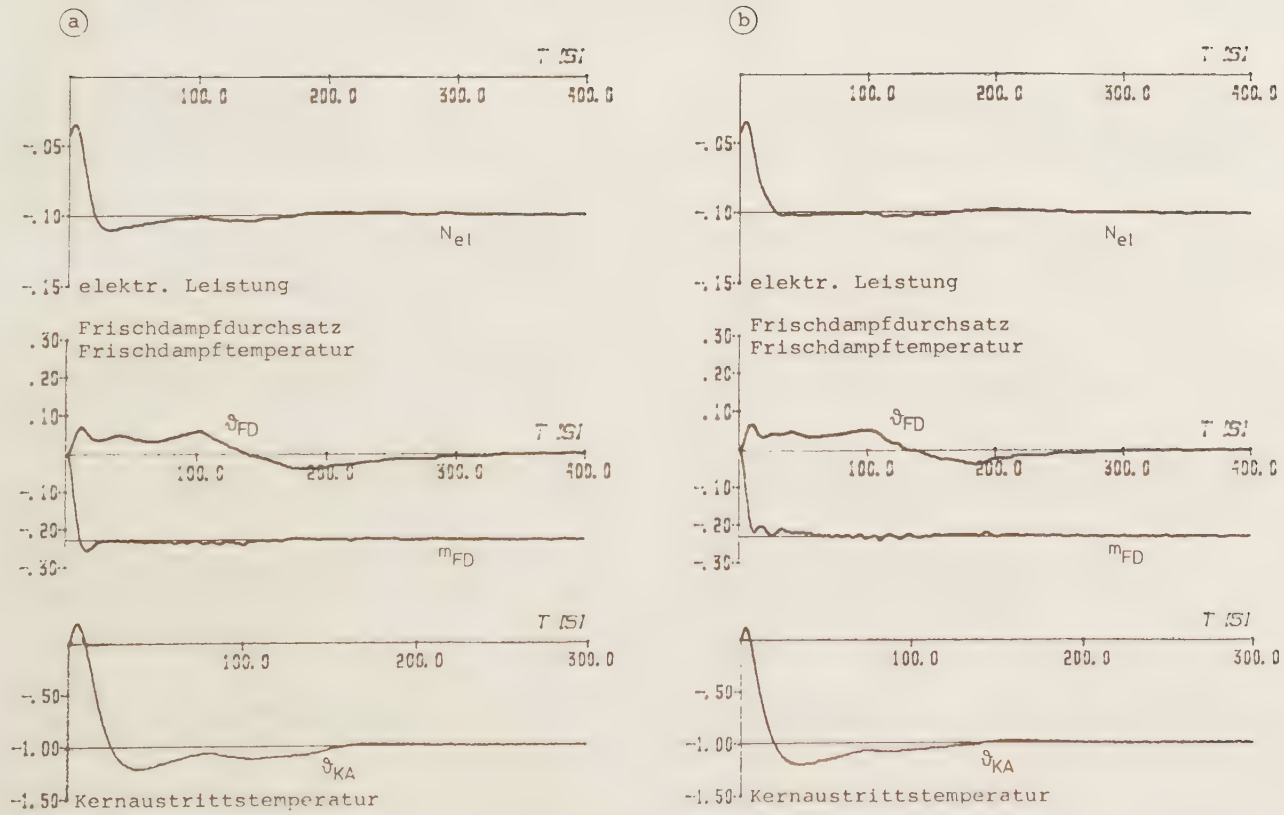



Bild U.2b. Regelverhalten der gesamten Anlage bei sprungförmiger Sollwertänderung der elektrischen Leistung (75 % Last), mit Modellvergleichsverfahren und (a) ohne und (b) mit Anpassung des Beobachters

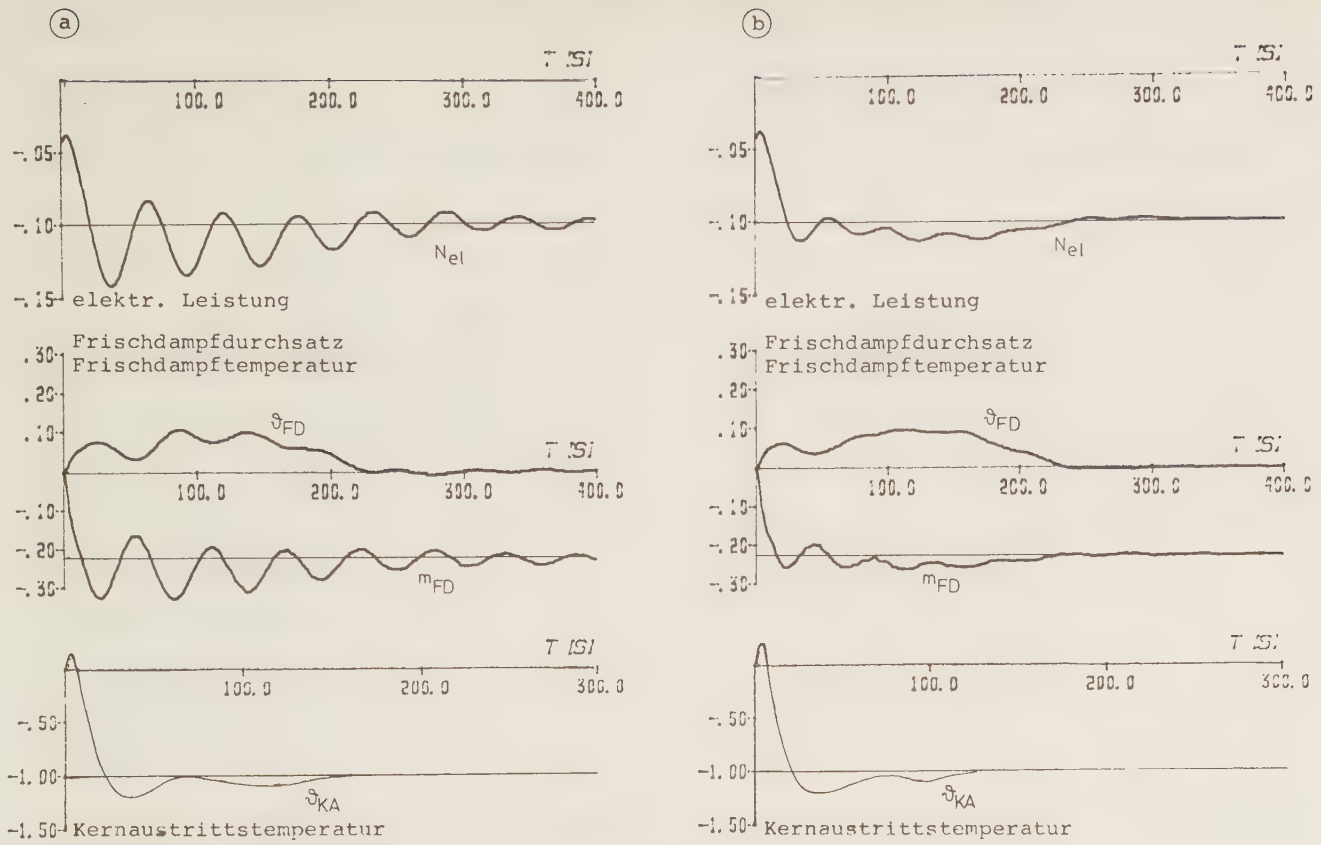



Bild U.3a. Regelverhalten der gesamten Anlage bei sprungförmiger Sollwertänderung der elektrischen Leistung (50 % Last), ⓐ ohne und ⓑ mit Anpassung des Beobachters

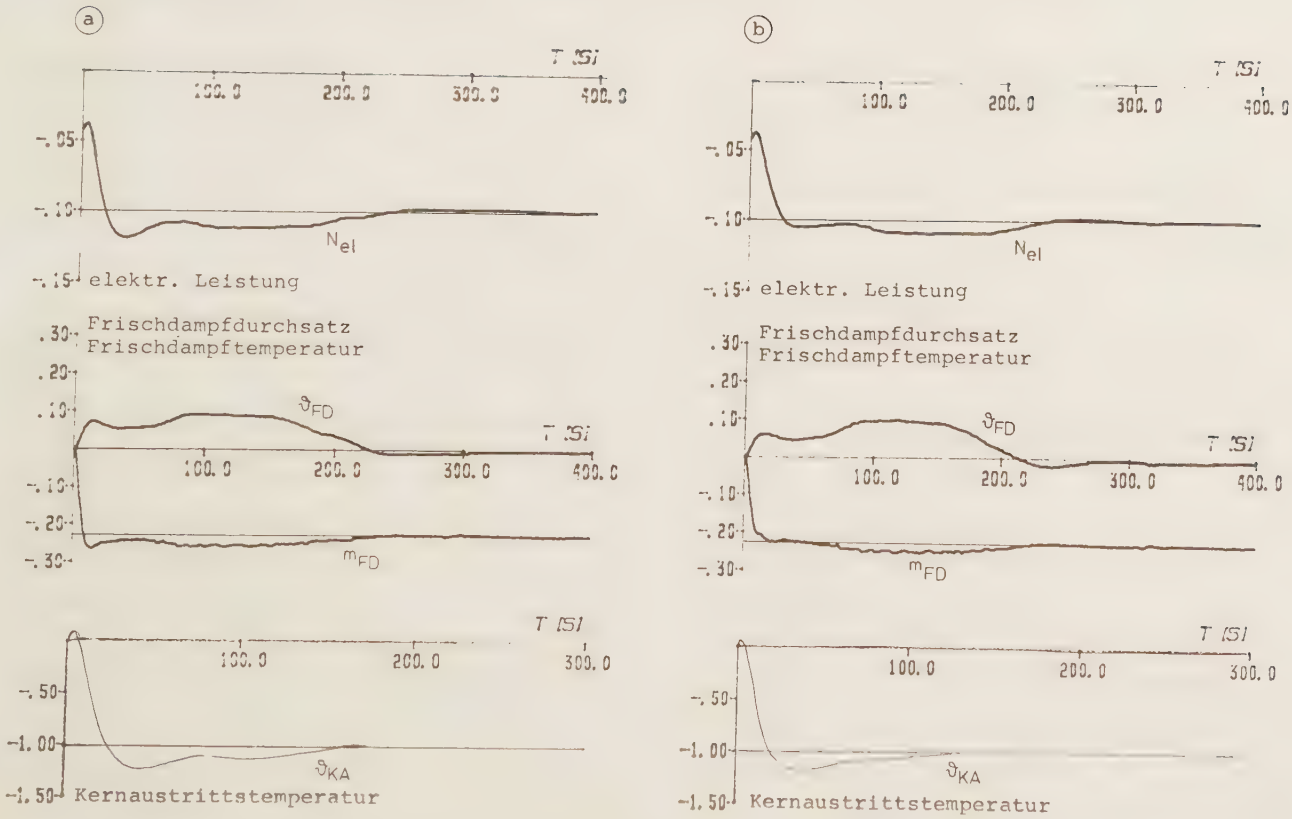



Bild U.3b. Regelverhalten der gesamten Anlage bei sprungförmiger Sollwertänderung der elektrischen Leistung (50 % Last), mit Modellvergleichsverfahren und (a) ohne und (b) mit Anpassung des Beobachters

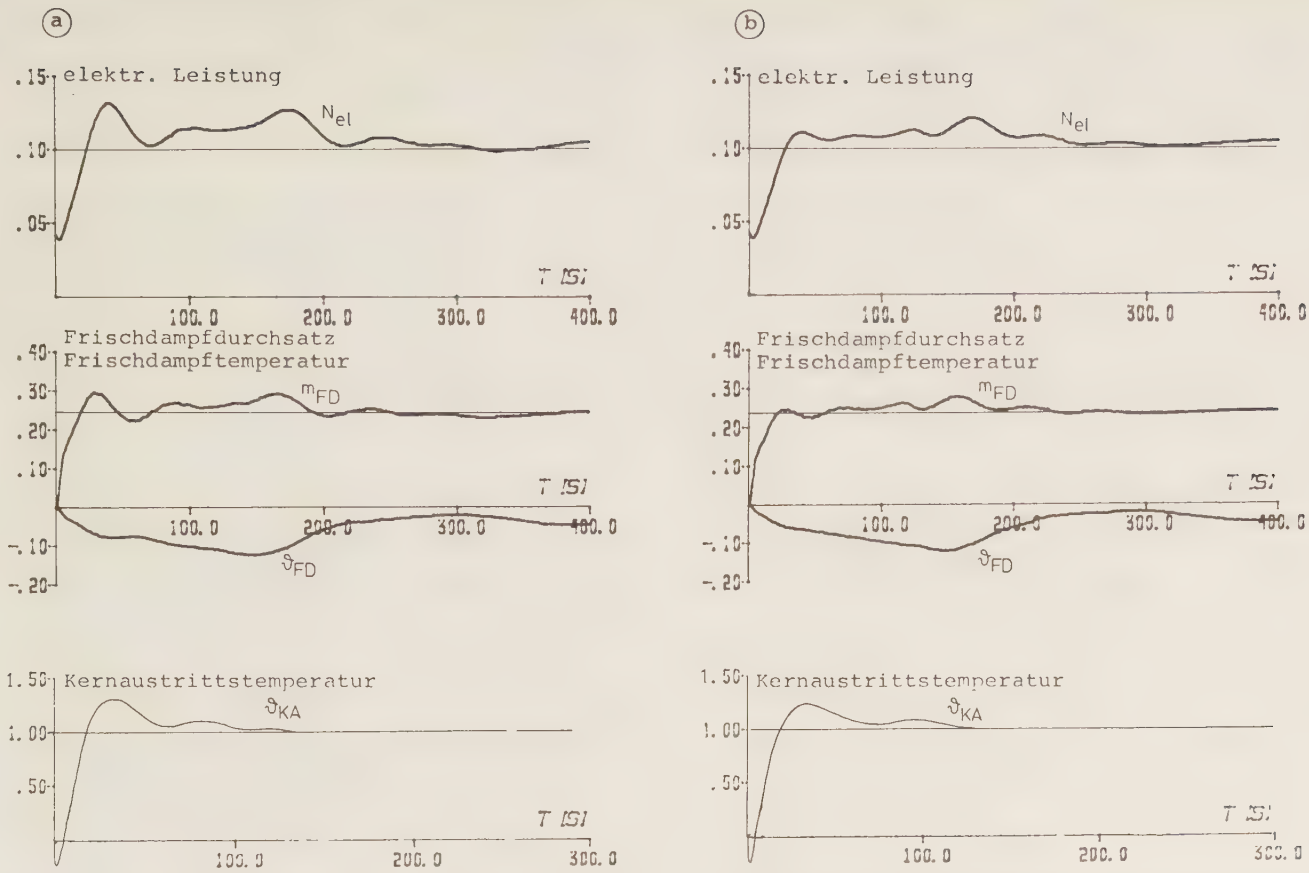



Bild U.4a. Regelverhalten der gesamten Anlage bei sprungförmiger Sollwertänderung der elektrischen Leistung (30 % Last), (a) ohne und (b) mit Anpassung des Beobachters

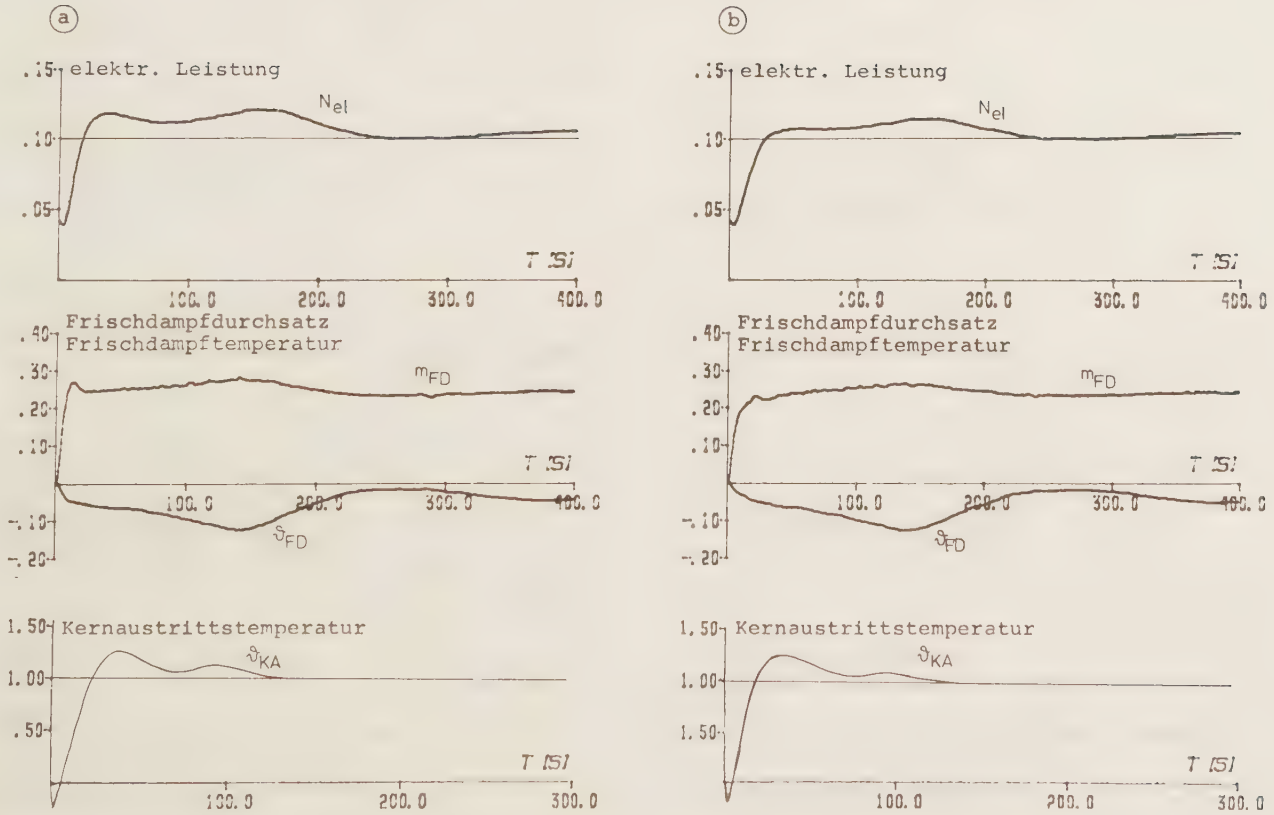



Bild U.4b. Regelverhalten der gesamten Anlage bei sprungförmiger Sollwertänderung der elektrischen Leistung (30 % Last), mit Modellvergleichsverfahren und (a) ohne und (b) mit Anpassung des Beobachters

Kyungsuk Jun

Bochum, den 30.3.1982

## Lebenslauf

| | |
|---|---|
| 7.9.1944 | geboren in Pyongnam, Korea. |
| 1950 - 1956 | Elementarschule Maya in Kobe, Japan. |
| 1956 - 1958 | Mittelschule Ueno in Kobe, Japan. |
| 1958 - 1959 | Mittelschule Kyong-Bock in Seoul, Korea. |
| 1959 - 1962 | Höhere Schule Kyong-Bock in Seoul, Korea. |
| 1962 - 1963 | Industriepraktikum bei der Firma:<br>- Bruderhaus, Papiermaschinenfabrik in Reutlingen<br>- Barfuss, Wirkmaschinenfabrik in Wilhelmshaven |
| 1963 - 1966 | Maschinenbaustudium an der Ingenieurschule, Ohm-polytechnikum, Nürnberg. |
| 1967 - 1968 | Hilfsassistent an der Technischen Universität Stuttgart. |
| 1968 - 1974 | Maschinenbaustudium an der Universität Stuttgart. |
| 1974 - 1975 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Abteilung Prozeßrechner und Regelungstechnik/IVD des Fachbereichs Energietechnik der Universität Stuttgart. |
| 1975 - 1977 | Wissenschaftliche Tätigkeit bei der Firma Interatom, Internationale Atomreaktorbau GmbH, in Bergisch Gladbach. |
| seit 1977 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung der Abteilung Elektrotechnik der Ruhr-Universität Bochum. |

| Poti | 100% | 75% | 50% | 30% |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.5340 | 0.7003 | 0.6115 | 0.4602 |
| 2 | 0.0851 | 0.1093 | 0.1634 | 0.2563 |
| 3 | 0.1278 | 0.1084 | 0.0835 | 0.0474 |
| 4 | 0.2590 | 0.1434 | 0.0678 | 0.0338 |
| 5 | 0.1215 | 0.1952 | 0.2457 | 0.7019 |
| 6 | 0.3210 | 0.3295 | 0.1140 | 0.0169 |
| 7 | 0.4060 | 0.2767 | 0.1300 | -0.1141 |
| 8 | 0.5701 | 0.3063 | 0.1297 | 0.0603 |
| 9 | 0.4497 | 0.3974 | 0.3569 | 0.3278 |
| 10 | 0.8521 | 0.5788 | 0.3978 | -0.2742 |
| 11 | 0.5315 | 0.4777 | 0.4723 | 0.5749 |
| 12 | 0.1044 | 0.0682 | 0.0401 | 0.0262 |
| 13 | 0.2448 | 0.1739 | 0.1796 | 0.0009 |
| 14 | 0.2358 | 0.2666 | 0.0743 | 0.0135 |
| 15 | 0.6561 | 0.2386 | 0.0586 | 0.0006 |
| 16 | 0.1498 | 0.0907 | 0.0412 | 0.0049 |
| 17 | 0.0109 | 0.0013 | 0.0332 | 0.1157 |
| 18 | 0.1695 | 0.6069 | 0.2422 | 0.2145 |
| 19 | 0.4562 | 0.0633 | 0.0037 | -0.0004 |
| 20 | 0.3876 | 0.1699 | -0.0403 | 0.0013 |
| 21 | 0.2459 | 0.0684 | 0.0133 | 0.0015 |
| 22 | 0.9499 | 0.4244 | 0.1415 | 0.0698 |
| 23 | 0.4481 | 0.1699 | 0.0393 | ——— |
| 24 | 0.3531 | 0.2519 | 0.1490 | 0.1440 |
| 25 | 0.6394 | 0.4057 | 0.2053 | ——— |
| 26 | 0.3721 | 0.2928 | 0.1859 | ——— |
| 27 | 0.1037 | 0.0673 | 0.0385 | 0.0174 |
| 28 | 0.0208 | -0.0126 | -0.0205 | 0.1040 |
| 29 | 0.2064 | 0.3970 | 0.4982 | 0.0193 |

| Poti | 100% | 75% | 50% | 30% |
|---|---|---|---|---|
| 30 | 0.6420 | 0.7216 | 0.6311 | 0.5589 |
| 31 | 0.1015 | 0.0666 | 0.0489 | 0.0361 |
| 32 | 0.1979 | 0.0522 | 0.0151 | 0.0131 |
| 33 | 0.0862 | 0.0665 | 0.0084 | -0.0170 |
| 34 | 0.3924 | 0.3392 | 0.1492 | 0.0298 |
| 35 | 0.9039 | 0.7452 | 0.5059 | 0.0870 |
| 36 | 0.1584 | 0.1262 | 0.0839 | 0.0017 |

Tabelle N.1. Potentiometereinstellwerte für das Analogrechenschaltbild des Zwischenwärmetauschermodells

Anhang O: Zustandsraummodell (Modell II)

(1a) Zustandsraummodell des Reaktors für 100 % Last

MATRIX $\underline{A}_K$ DIMENSION 6* 6, ABTASTZEIT = .300

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | -1.10000 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | -.500000 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.300000E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.200000 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.940000E-01 |
| ( 6) | -1.10000 | -.500000 | -.300000E-01 | -.200000 | -.940000E-01 |

| | ( 6) |
|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 |

MATRIX $\underline{B}_K$ DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .300

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | -8.02090 |
| ( 2) | 7.46070 |
| ( 3) | .403000E-01 |
| ( 4) | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 |
| ( 6) | -.194007E-01 |

MATRIX $\underline{C}_K$ DIMENSION 1* 6, ABTASTZEIT = .300

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

| | ( 6) |
|---|---|
| ( 1) | 1.00000 |

MATRIX $\underline{B}_{zK}$ DIMENSION 6* 2, ABTASTZEIT = .300

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | 1.52990 | .650000 |
| ( 2) | -5.45060 | -2.63520 |
| ( 3) | .000000E+00 | -.257600E-01 |
| ( 4) | .155000 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | 1.99460 |
| ( 6) | -3.76470 | -.163600E-01 |

(1b) Zustandsraummodell des Reaktors für 75 % Last

MATRIX $\underline{A}_K$ DIMENSION 6* 6, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | -.900000 | .000030E+00 | .000000E+00 | .000300E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | -.450000 | .000030E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000030E+00 | -.300000E-01 | .000300E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000030E+00 | -.180000 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000030E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.760000E-01 |
| ( 6) | -.900000 | -.450000 | -.300000E-01 | -.180300 | -.760000E-01 |

| | ( 6) |
|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 |

MATRIX $\underline{B}_K$ DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | -13.4129 |
| ( 2) | 11.8121 |
| ( 3) | .678500E-01 |
| ( 4) | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 |
| ( 6) | -1.83300 |

MATRIX $\underline{C}_K$ DIMENSION 1* 6, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

| | ( 6) |
|---|---|
| ( 1) | 1.00000 |

MATRIX $\underline{B}_{zK}$ DIMENSION 6* 2, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | 1.90170 | .425700 |
| ( 2) | -6.75520 | -1.77020 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .252000 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | 1.35440 |
| ( 6) | -4.60150 | .989985E-02 |

(1c) Zustandsraummodell des Reaktors für 50 % Last

MATRIX $\underline{A}_K$ DIMENSION 6* 6, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) | ( 6) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | -.500000 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | -.400000 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.250000E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.183300 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.500000E-01 | .000000E+00 |
| ( 6) | -.500000 | -.400000 | -.250000E-01 | -.183300 | -.500000E-01 | .000000E+00 |

MATRIX $\underline{B}_K$ DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | -32.8782 |
| ( 2) | 31.5622 |
| ( 3) | .116000 |
| ( 4) | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 |
| ( 6) | -.699998 |

MATRIX $\underline{C}_K$ DIMENSION 1* 6, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) | ( 6) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 |

MATRIX $\underline{B}_{zK}$ DIMENSION 6* 2, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -2.20280 | -1.42830 |
| ( 2) | -5.92740 | -.165000E-01 |
| ( 3) | .000000E+00 | -.252800E-01 |
| ( 4) | .369600 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .922900 |
| ( 6) | -7.75060 | -.547130 |

(1d) Zustandsraummodell des Reaktors für 30 % Last

MATRIX $\underline{A}_K$ DIMENSION 6* 6, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) | ( 6) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | -.500000 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 37014.6 |
| ( 2) | .000000E+00 | -.250000 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.190000E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -1.000000E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.460000E-01 | .000000E+00 |
| ( 6) | -.500000 | -.250000 | -.190000E-01 | -1.000000E-01 | -.460000E-01 | .000000E+00 |

MATRIX $\underline{B}_K$ DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | -10.4927 |
| ( 2) | 9.91900 |
| ( 3) | .218600 |
| ( 4) | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 |
| ( 6) | .144900 |

MATRIX $\underline{C}_K$ DIMENSION 1* 6, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) | ( 6) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 |

MATRIX $B_{zK}$ DIMENSION 6* 2, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | 3.76120 | -.828400 |
| ( 2) | -11.6460 | -.147100 |
| ( 3) | .000000E+00 | .646340 |
| ( 4) | .953400 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | -.118553 |
| ( 6) | -6.93140 | -.447713 |

(2a) Zustandsraummodell des Dampferzeugers für 100 % Last

MATRIX $\underline{A}_K$, DIMENSION 12*12, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .002003E+00 | .165176E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | -.457017 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000009E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.188252E-01 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | -.814600E-01 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | 1.00000 | -.377337 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | -.344480 | 1.00000 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | -.145183E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | -.586400E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.160524 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | 1.00000 | -.189265 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.291667 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | -.549243 |
| (11) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .367300 | 1.00000 | .236675 | 1.00000 | -.123303 |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.165175E-01 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | -.795800E-01 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | -.425940 |

MATRIX $\underline{B}_K$ DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.343440E-01 | -.317040E-01 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .849330E-01 | .000000E+00 |
| ( 4) | -.300000 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .679500E-01 |
| ( 6) | .000000E+00 | .720000 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | .000000E+00 | -.360000 |
| (12) | .506584 | .720000 |

MATRIX $\underline{C}_K$ DIMENSION 2*12, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | 1.00000 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | 1.00000 |

MATRIX $\underline{B}_{zK}$ DIMENSION 12* 3, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) |
|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .247250E-01 | -.579600E-01 |
| ( 2) | .000000E+00 | 3.53197 | .000000E+00 |
| ( 3) | -.209520 | -.196500E-01 | .000000E+00 |
| ( 4) | -.480000 | -1.59000 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .616500E-02 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | .360000 |
| ( 7) | .000000E+00 | .871350 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | -.238463 | .000000E+00 |
| ( 9) | 2.38000 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | 11.3240 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | .000000E+00 | 3.83197 | -.450000 |
| (12) | 11.3440 | -1.73846 | .360000 |

(2b) Zustandsraummodell des Dampferzeugers für 75 % Last

MATRIX $\underline{A}_K$ DIMENSION 12*12, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .114994E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | -.183000 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.105317E-01 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | -.631500E-01 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | 1.00000 | -.110820 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | .133320 | 1.00000 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | -.861103E-02 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | -.429200E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.130226 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | 1.00000 | -.201234 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | -.496509 |
| (11) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | 153562 | 1.00000 | -.475491E-02 | 1.00000 | -.300029 |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | - 114994E-01 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | - 721903E-01 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | -.196460 |

MATRIX $\underline{B}_K$ DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.224055E-01 | -.906150E-02 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .738000E-01 | .000000E+00 |
| ( 4) | -.900000E-01 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .192600E-01 |
| ( 6) | .000000E+00 | .246000 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | -.360000E-01 | -.135000 |
| (12) | .129000 | .246000 |

MATRIX $\underline{C}_K$, DIMENSION 2*12, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | 1.00000 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | 1.00000 |

MATRIX $\underline{B}_{zK}$ DIMENSION 12* 3, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) |
|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .348850E-02 | -.319500E-01 |
| ( 2) | .000000E+00 | 1.57810 | .000000E+00 |
| ( 3) | -.135440 | -.227100E-01 | .000000E+00 |
| ( 4) | -.560000 | -.950000 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | .350000 |
| ( 7) | .000000E+00 | .775475 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | -1.02000 | .000000E+00 |
| ( 9) | 2.31600 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | 8.00500 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | .000000E+00 | 2.00310 | -.270000 |
| (12) | 7.44000 | -1.97000 | .350000 |

(2c) Zustandsraummodell des Dampferzeugers für 50 % Last

MATRIX $\underline{A}_K$ DIMENSION 12*12, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .761720E-02 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | -.385123 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.527431E-02 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | -.534404E-01 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | 1.00000 | -.312923 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | .315596E-01 | 1.00000 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | -.311737E-02 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | -.350000E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.771875E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | 1.00000 | -.254565 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.170191 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | -.452450 |
| (11) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .500000E-01 | 1.00000 | -.159565 | 1.00000 | -.367450 |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | - 761720E-02 | 000000E+00 |
| ( 2) | 000000E+00 | 000000E+00 |
| ( 3) | 000000E+00 | 000000E+00 |
| ( 4) | 000000E+00 | 000000E+00 |
| ( 5) | 000000E+00 | 000000E+00 |
| ( 6) | 000000E+00 | 000000E+00 |
| ( 7) | 000000E+00 | 000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | 000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | - 722000E-01 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | -.850000E-01 |

MATRIX $\underline{B}_K$ DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.122250E-01 | -.150423E-02 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .316500E-01 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .207000E-02 |
| ( 6) | .000000E+00 | .112361 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | -.506355E-01 | -.300000E-01 |
| (12) | .291375 | .112361 |

MATRIX $\underline{C}_K$ DIMENSION 2*12, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | 1.00000 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | 1.00000 |

MATRIX $\underline{B}_{zK}$ DIMENSION 12* 3, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) |
|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .223923E-01 | -.159600E-01 |
| ( 2) | .000000E+00 | 2.36515 | .000000E+00 |
| ( 3) | -.760000E-01 | -.211750E-01 | .000000E+00 |
| ( 4) | -.600000 | -.640000 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | .225000 |
| ( 7) | .000000E+00 | .545270 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | -3.51322 | .000000E+00 |
| ( 9) | 2.00000 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | 5.43000 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | .000000E+00 | 2.68515 | -.195000 |
| (12) | 4.83200 | -4.15322 | .225000 |

(2d) Zustandsraummodell des Dampferzeugers für 30 % Last

MATRIX $\underline{A}_K$ DIMENSION 12*12, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .160288E-02 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | -.140266 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.179240E-02 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | -.106103E-01 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | 1.00000 | -.103866 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | .493897E-01 | 1.00000 |

| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | -.644390E-03 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | -.155800E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 | -.119232E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | 1.00000 | -.830000E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | -.500000E-01 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | 1.00000 | -.432675 |
| (11) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (12) | .444200E-01 | 1.00000 | -.230000E-01 | 1.00000 | -.372675 |

| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.160288E-02 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | -.364000E-01 | .000000E+00 |
| (12) | .000000E+00 | -.500000E-01 |

MATRIX $\underline{B}_K$ DIMENSION 12* 2, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -.129832E-02 | -.501000E-04 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 3) | .457050E-02 | .000000E+00 |
| ( 4) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .785000E-05 |
| ( 6) | .000000E+00 | .300000E-01 |
| ( 7) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 9) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | -.630000E-01 | -.990000E-02 |
| (12) | .423900 | .300000E-01 |

MATRIX $\underline{C}_K$ DIMENSION 2*12, ABTASTZEIT = .000

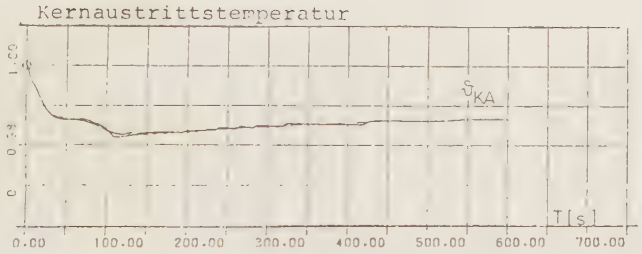
| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

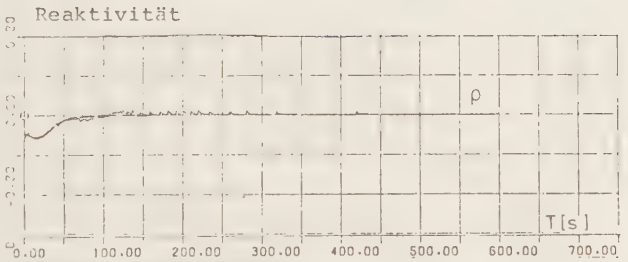
| | ( 6) | ( 7) | ( 8) | ( 9) | (10) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |

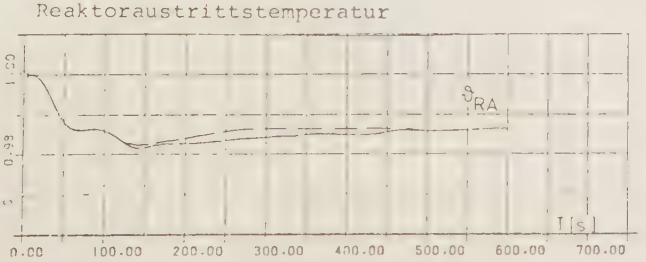
| | (11) | (12) |
|---|---|---|
| ( 1) | 1.00000 | .000000E+00 |
| ( 2) | .000000E+00 | 1.00000 |

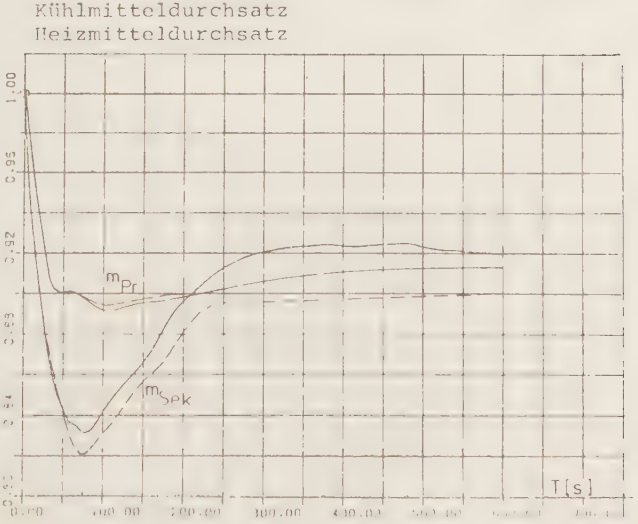
MATRIX $\underline{B}_{zK}$ DIMENSION 12* 3, ABTASTZEIT = .000

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) |
|---|---|---|---|
| ( 1) | .000000E+00 | .226630E-02 | -.179430E-02 |
| ( 2) | .000000E+00 | 1.14933 | .000000E+00 |
| ( 3) | -.563000E-02 | -.254950E-02 | .000000E+00 |
| ( 4) | -.104000 | -.113050 | .000000E+00 |
| ( 5) | .000000E+00 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| ( 6) | .000000E+00 | .000000E+00 | .600000E-01 |
| ( 7) | .000000E+00 | .349775E-01 | .000000E+00 |
| ( 8) | .000000E+00 | -.114250 | .000000E+00 |
| ( 9) | .423600E-01 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (10) | 6.40000 | .000000E+00 | .000000E+00 |
| (11) | .000000E+00 | 1.20983 | -.900000E-01 |
| (12) | 6.29600 | -.227300 | .600000E-01 |



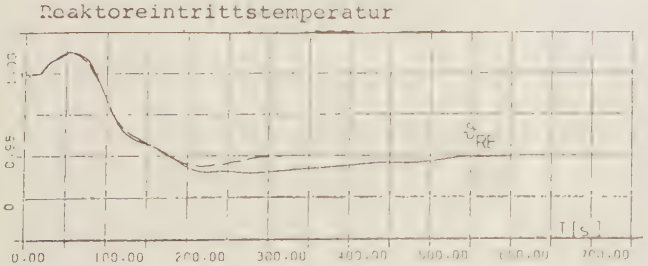
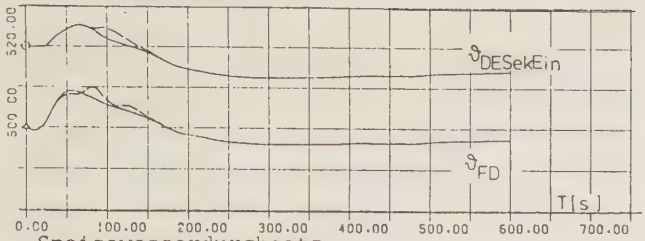
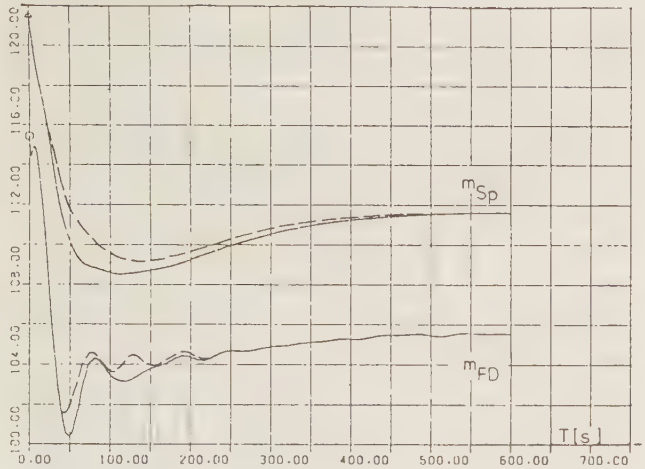




Bild P.1. Vergleich der mathematischen (- - -) und mathematisch-physikalischen (———) Modelle im geschlossenen Regelkreis mit konventionellem Regelungskonzept (100 % Last)

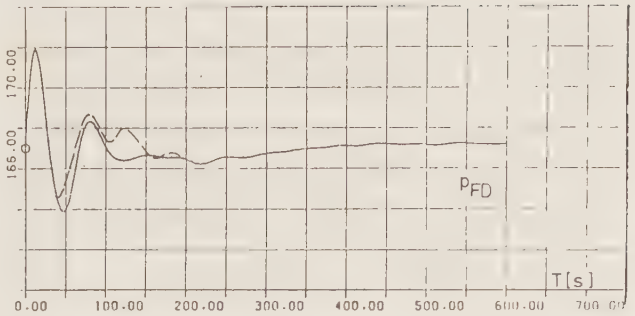
Heizmitteleintrittstemperatur
Frischdampftemperatur




Speisewasserdurchsatz
Frischdampfdurchsatz




Frischdampfdruck




Elektrische Leistung

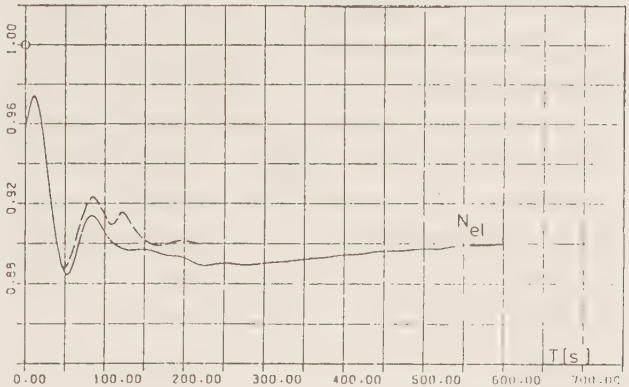



Bild P.1. Fortsetzung

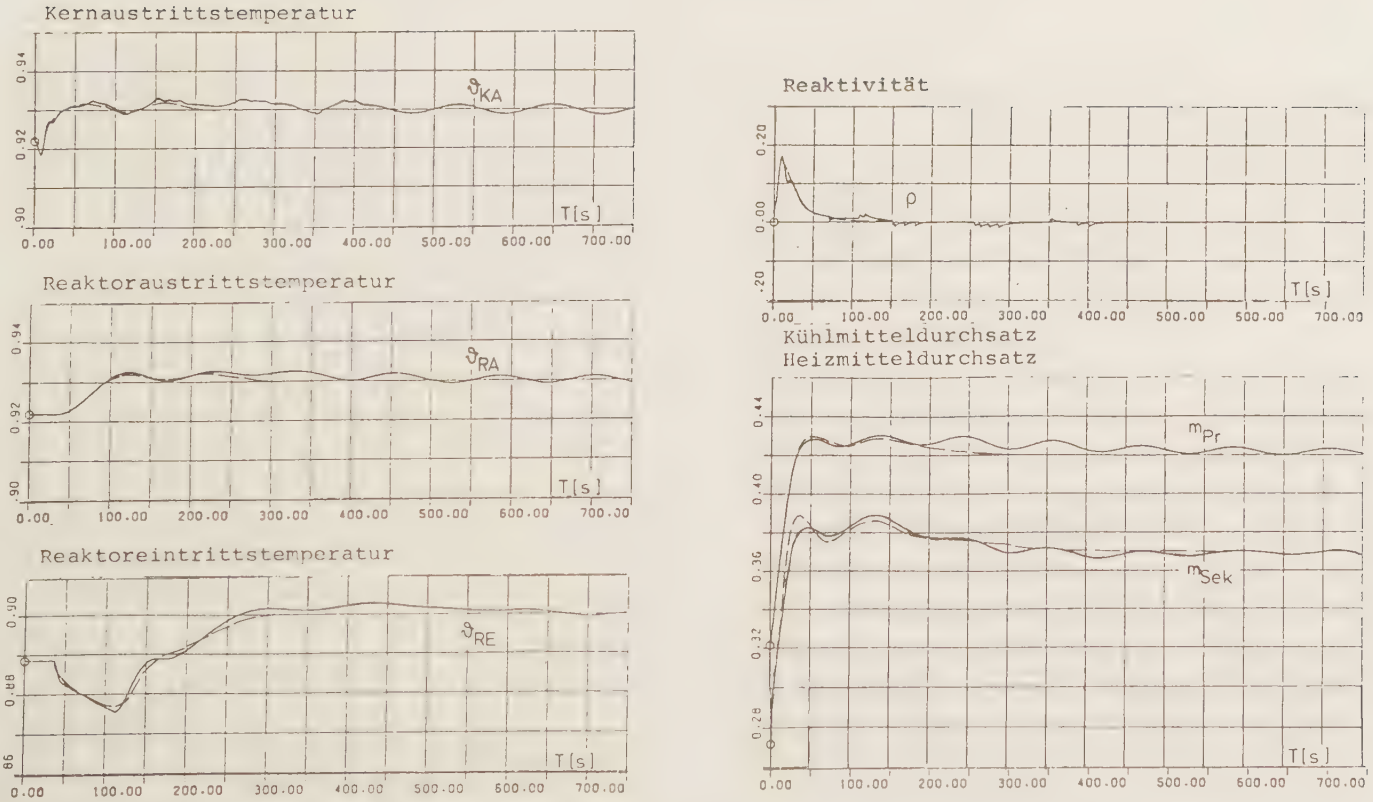
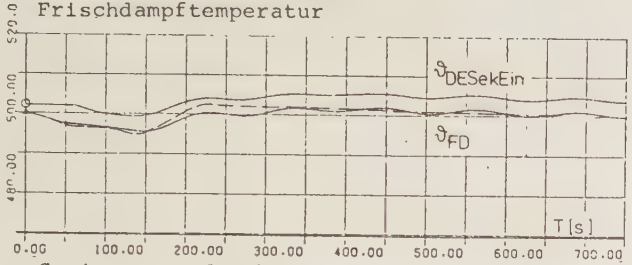
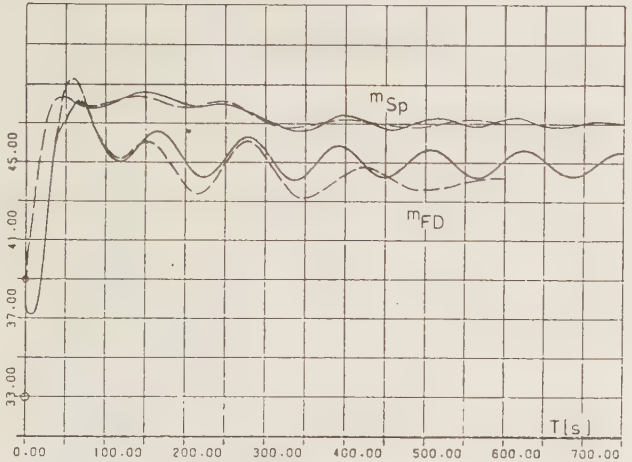



Bild P.2. Vergleich der mathematischen (- - -) und mathematisch-physikalischen (———) Modelle im geschlossenem Regelkreis mit konventionellem Regelungskonzept (30 % Last)

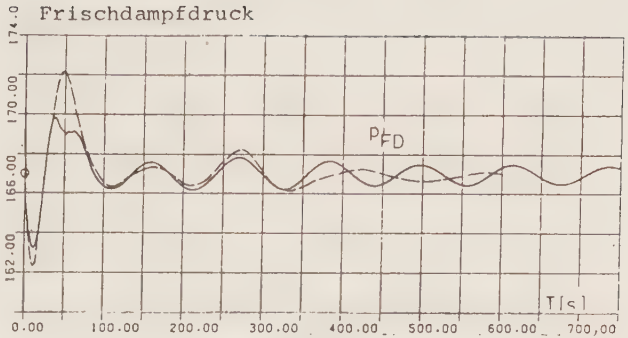
Heizmitteleintrittstemperatur
Frischdampftemperatur




Speisewasserdurchsatz
Frischdampfdurchsatz




Frischdampfdruck




Elektrische Leistung

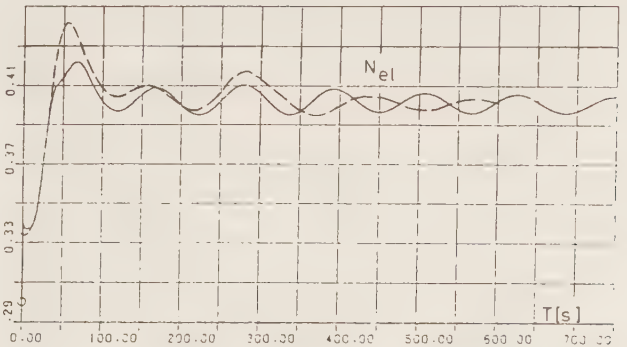



Bild P.2. Fortsetzung

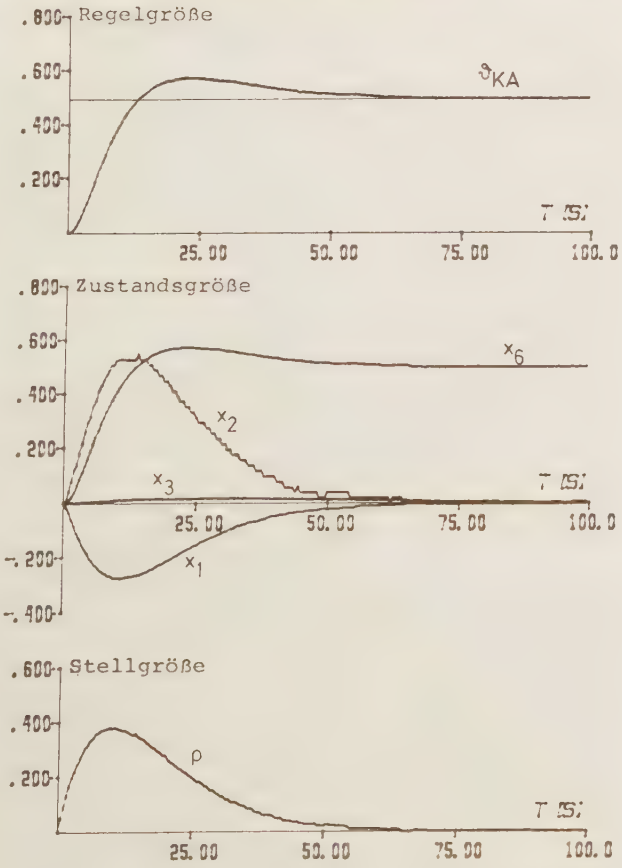



Bild Q.1a. Führungsverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Sollwertänderung (100 % Last)

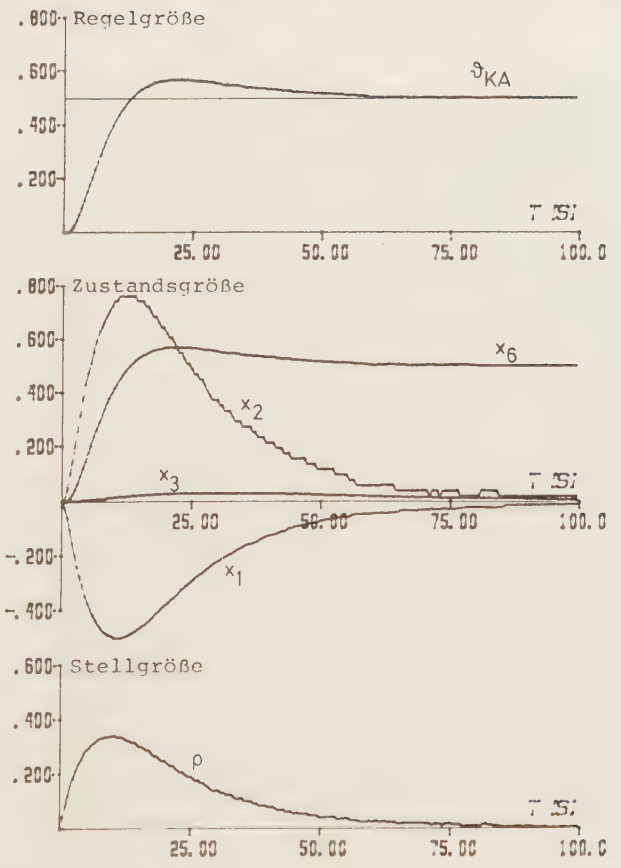



Bild Q.1b. Führungsverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Sollwertänderung (75 % Last)

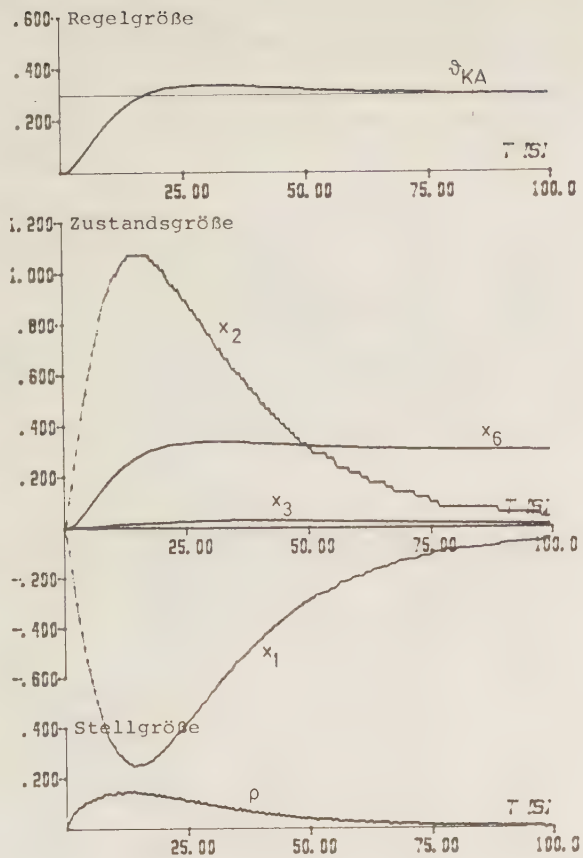



Bild 0.1c. Führungsverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Sollwertänderung (50 % Last)

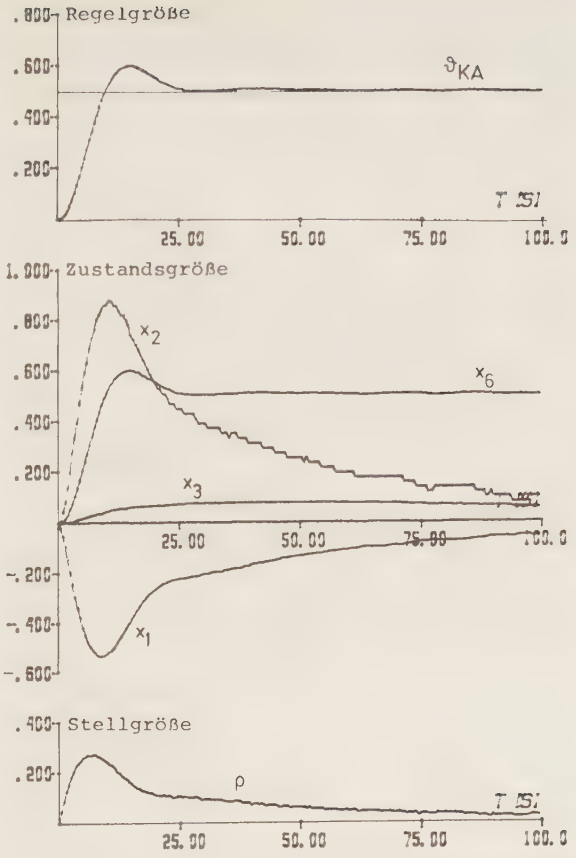



Bild 0.1d. Führungsverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Sollwertänderung (30 % Last)

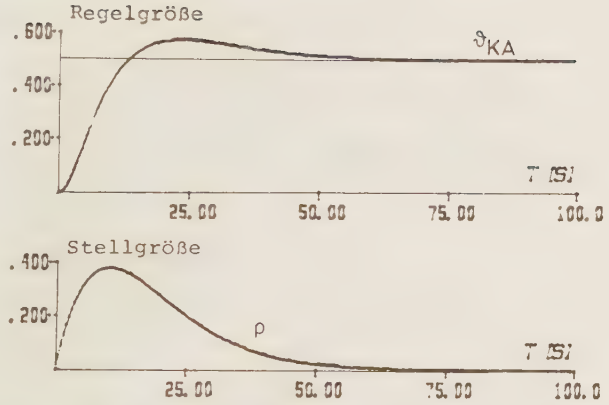



Bild Q.2a. Führungsverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Sollwertänderung (100 % Last)

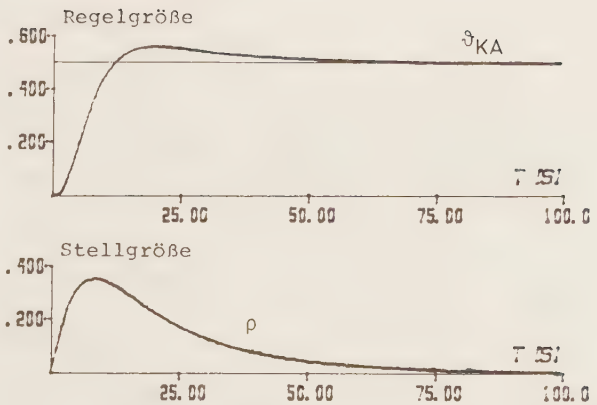



Bild Q.2b. Führungsverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Sollwertänderung (75 % Last)

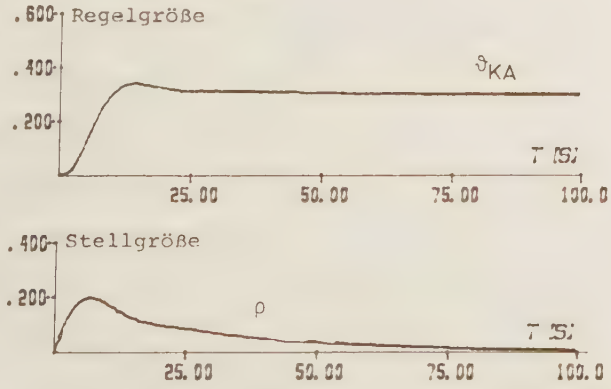



Bild Q.2c. Führungsverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Sollwertänderung (50 % Last)

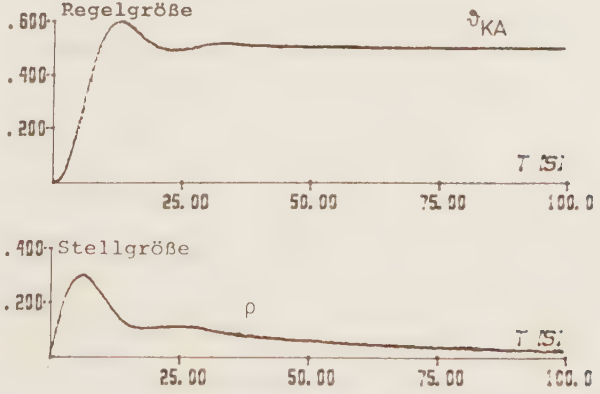



Bild Q.2d. Führungsverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Sollwertänderung (30 % Last)

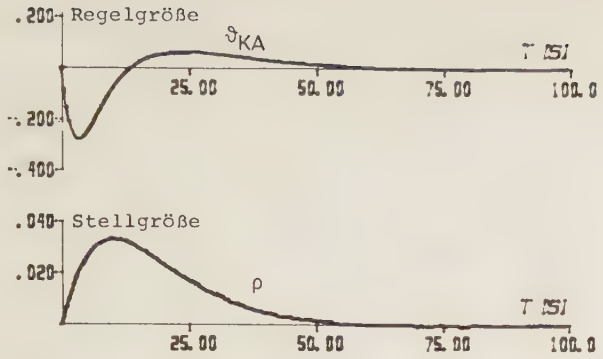



Bild Q.3a. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (100 % Last)

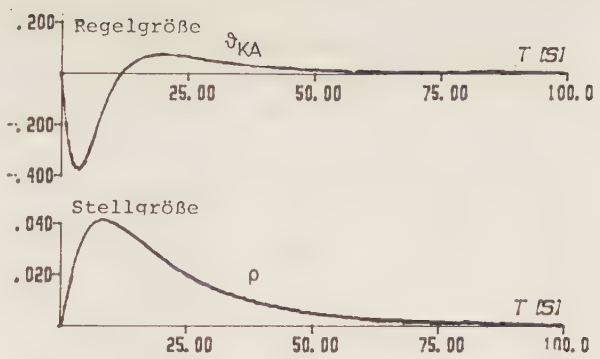



Bild Q.3b. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (75 % Last)

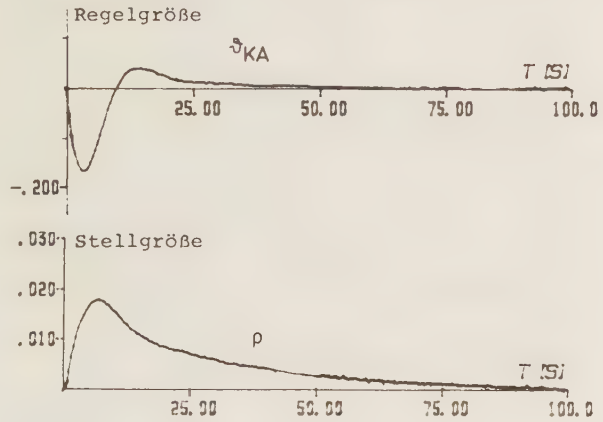



Bild Q.3c. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (50 % Last)

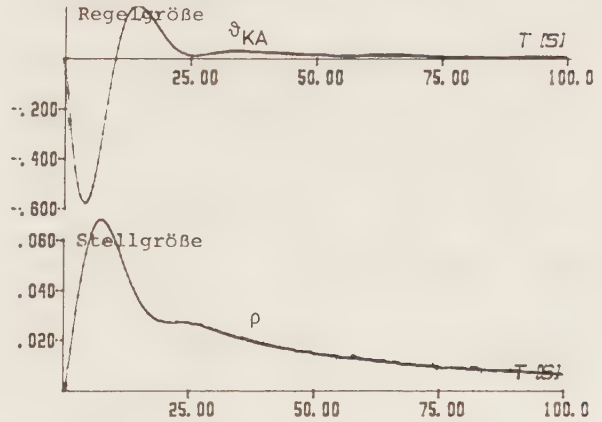



Bild Q.3d. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (30 % Last)

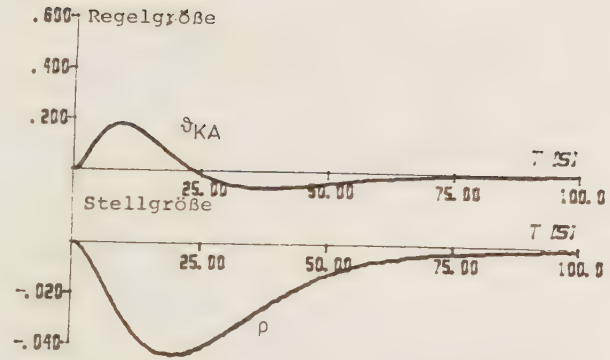



Bild Q.4a. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (100 % Last)

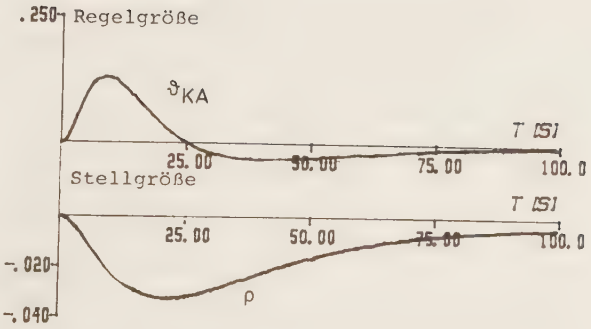



Bild Q.4b. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (75 % Last)

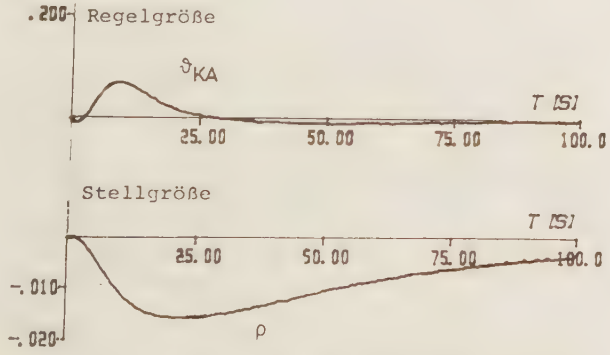



Bild Q.4c. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (50 % Last)

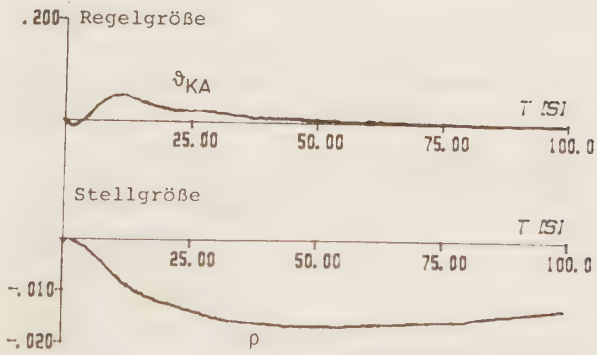



Bild Q.4d. Störverhalten mit Beobachter bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (30 % Last)

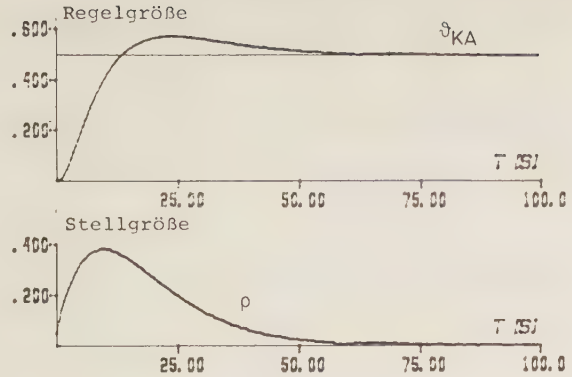



Bild 0.5a. Führungsverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Beobachter bei sprungförmiger Sollwertänderung (100 % Last)

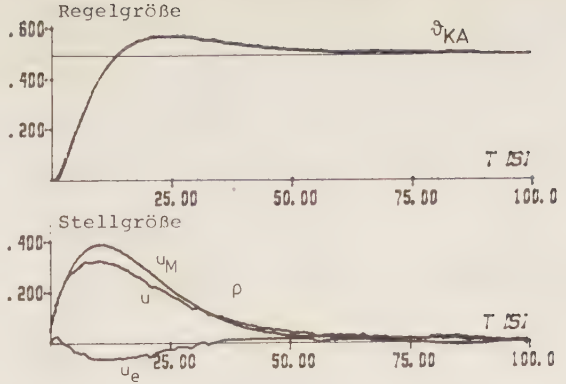



Bild 0.5b. Führungsverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Sollwertänderung (75 % Last)

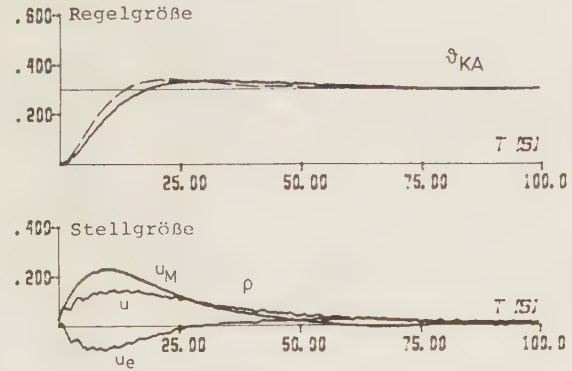



Bild 0.5c. Führungsverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Sollwertänderung (50 % Last)

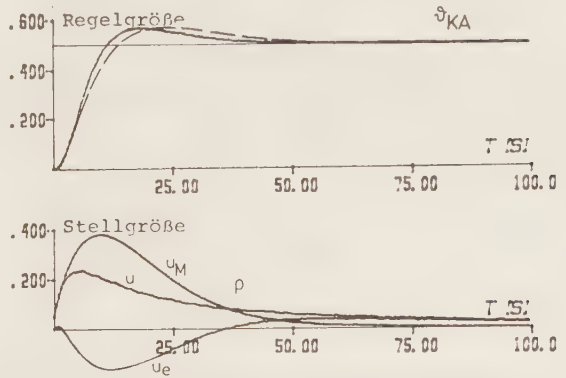



Bild 0.5d. Führungsverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Sollwertänderung (30 % Last)

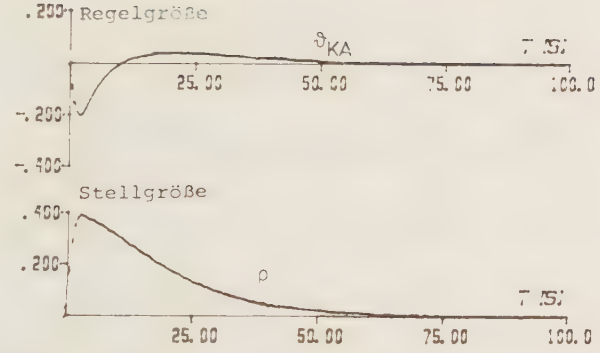



Bild O.6a. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Beobachter bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (100 % Last)

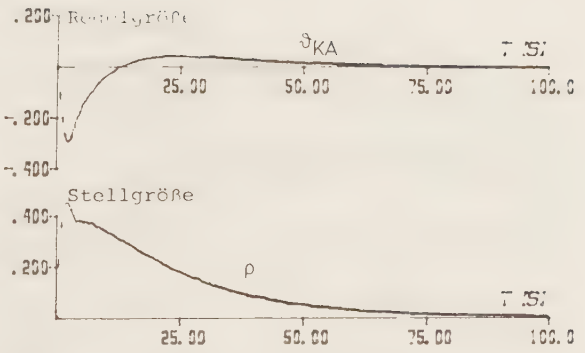



Bild O.6b. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (75 % Last)

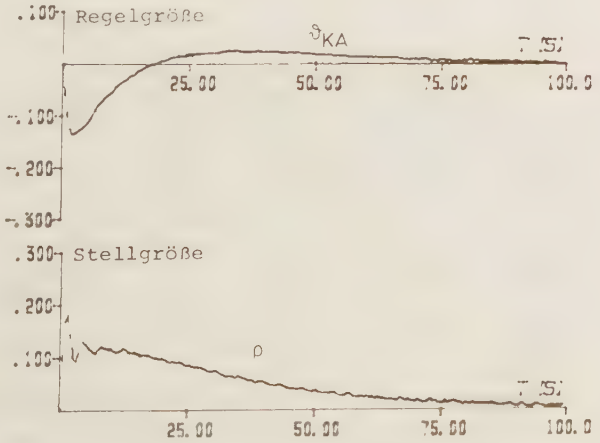



Bild O.6c. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (50 % Last)

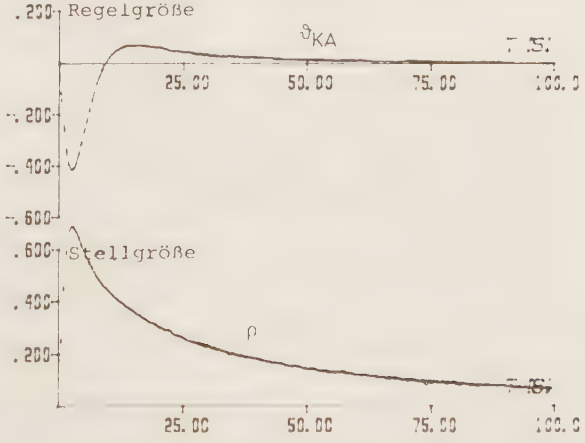



Bild O.6d. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (30 % Last)

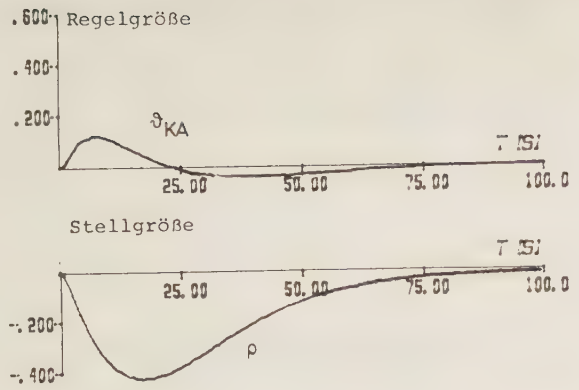



Bild Q.7a. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Beobachter bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (100 % Last)

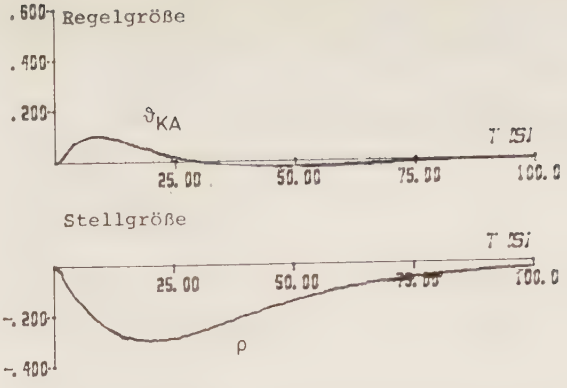



Bild Q.7b. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahrn und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (75 % Last)



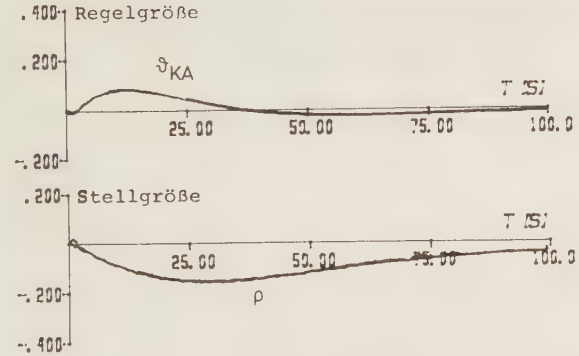



Bild Q.7c. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (50 % Last)

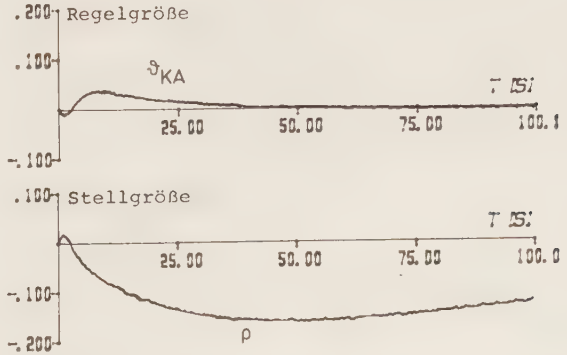



Bild Q.7d. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (30 % Last)

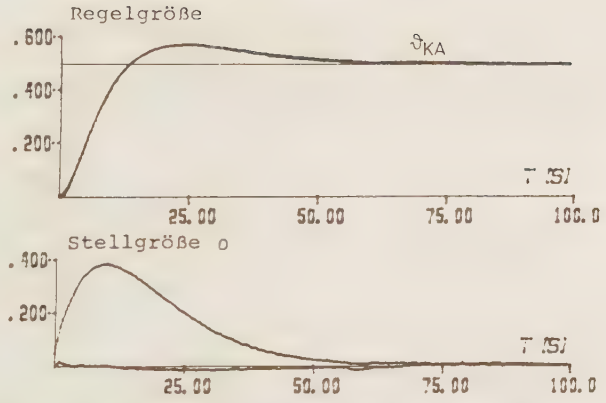



Bild Q.8a. Führungsverhalten mit Modellvergleichsverfahren und Beobachter bei sprungförmiger Sollwertänderung (100 % Last)

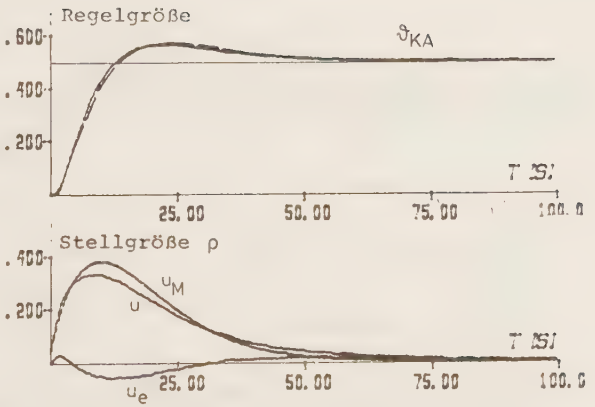



Bild Q.8b. Führungsverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Sollwertänderung (75 % Last)

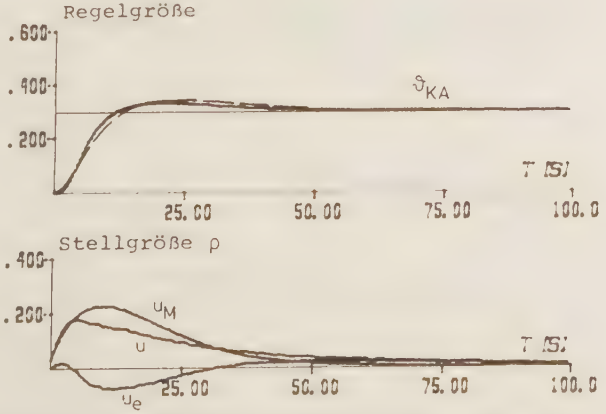



Bild Q.8c. Führungsverhalten mit Modellvergleichsverfahrn und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Sollwertänderung (50 % Last)

Bild Q.8d. Führungsverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Sollwertänderung (30 % Last)

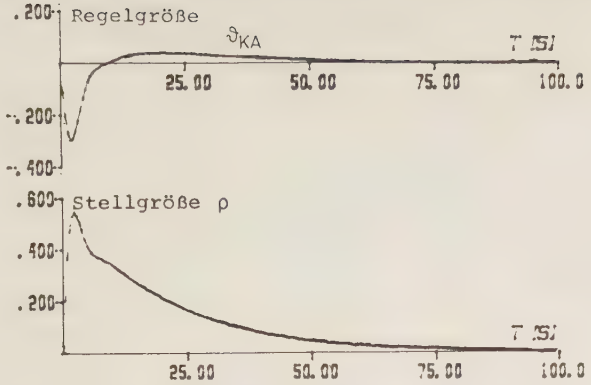



Bild Q.9a. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (75 % Last)

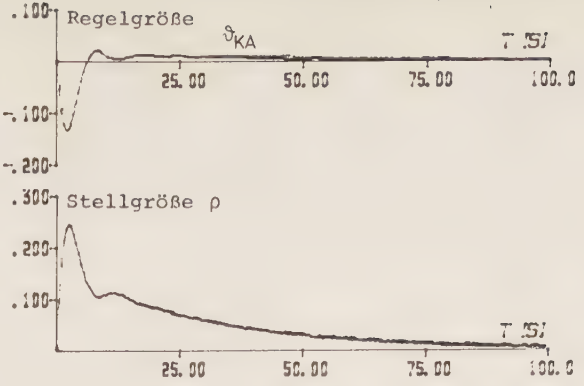



Bild Q.9b. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (50 % Last

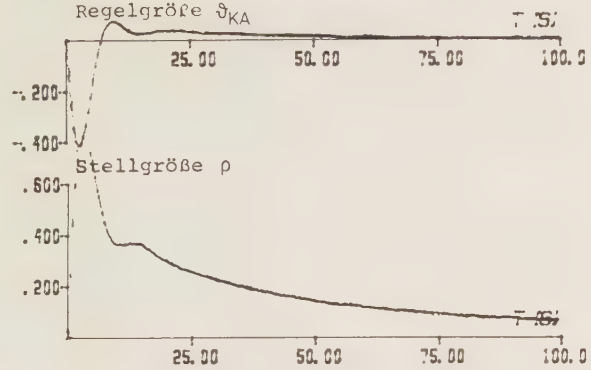



Bild Q.9c. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Durchsatzänderung des Kühlmittels (30 % Last)

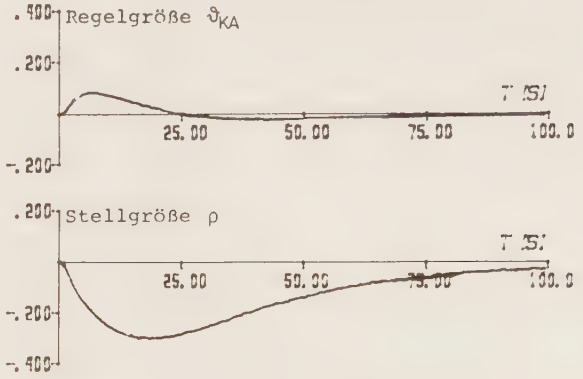



Bild Q.10a. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (75 % Last)

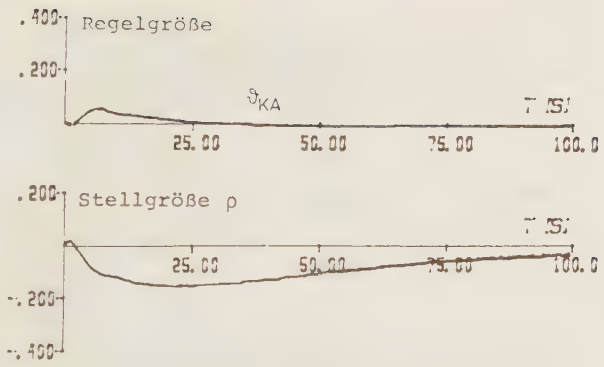



Bild 0.10b. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (50 % Last)

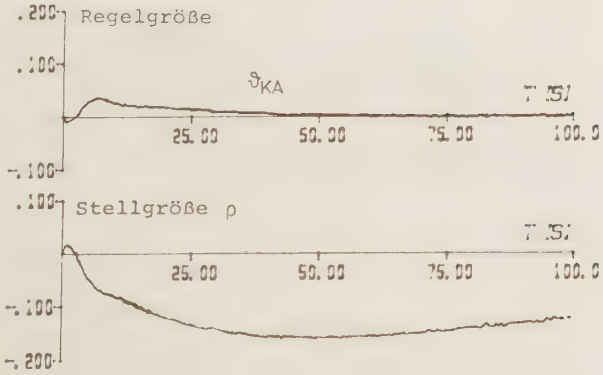



Bild 0.10c. Störverhalten mit Modellvergleichsverfahren und ohne Anpassung des Beobachters bei sprungförmiger Änderung der Reaktoreintrittstemperatur (30 % Last)

Anhang R: Optimaler Zustandsregler und Beobachter für Reaktorregelung

ⓐ PI-Zustandsregler (Nominalregler)

```
P-RUECKFUEHRUNG:
DIMENSION  1* 1

-.665903
ABT-STZEIT=   500000

I-RUECKFUEHRUNG:
DIMENSION  1* 1

 .184839

P-RUECKFUEHRMATRIX FUER DIE ERSTEN
   5 ZUSTANDSGROESSEN
DIMENSION  1* 5

 .484185      .269380      .298413E-01  .175086      .918994E-01

AUFSCHALTMATRIX G:
DIMENSION  1* 1

 .956389E-01
```

ⓑ PI-Zustandsregler

```
P-RUECKFUEHRUNG:
DIMENSION  1* 1

-1.63684
ABTASTZEIT=  .500000

I-RUECKFUEHRUNG:
DIMENSION  1* 1

 .257353

P-RUECKFUEHRMATRIX FUER DIE ERSTEN
   5 ZUSTANDSGROESSEN
DIMENSION  1* 5

 .732127      .390875      .280331E-01  .175755      .850292E-01

AUFSCHALTMATRIX G:
DIMENSION  1* 1

 .129534
```

ⓒ Störgrößenaufschaltmatrix

```
MATRIX E_z   DIMENSION  1* 2, ABTASTZEIT =    .500

          ( 1)          ( 2)
( 1)   .514564       .000000E+00
```

ⓓ Beobachter für Nominalmodell

MATRIX D DIMENSION 6* 5, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | 581549 | 231043E-02 | .150447E-03 | .973369E-03 | .466089E-03 |
| ( 2) | .112053E-01 | .784416 | .354944E-03 | .236201E-02 | .113091E-02 |
| ( 3) | -.651353E-02 | -.325770E-02 | .984901 | -.136938E-02 | -.555189E-03 |
| ( 4) | .590367E-02 | .295476E-02 | .191836E-03 | .906080 | .594557E-03 |
| ( 5) | .593030E-02 | .299178E-02 | .194171E-03 | .125777E-02 | .954689 |
| ( 6) | -.369642 | -.194456 | -.131523E-01 | -.839205E-01 | -.405329E-01 |

| | ( 6) |
|---|---|
| ( 1) | -.175141E-01 |
| ( 2) | -.449442E-01 |
| ( 3) | .271341E-01 |
| ( 4) | -.242544E-01 |
| ( 5) | -.247822E-01 |
| ( 6) | .780936 |

MATRIX E DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | .175141E-01 |
| ( 2) | .449442E-01 |
| ( 3) | -.271341E-01 |
| ( 4) | .242544E-01 |
| ( 5) | .247822E-01 |
| ( 6) | .219064 |

MATRIX G DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | -3.08843 |
| ( 2) | 3.29191 |
| ( 3) | 251905E-01 |
| ( 4) | -.451580E-02 |
| ( 5) | -.453177E-02 |
| ( 6) | .445182 |

MATRIX $G_z$ DIMENSION 6* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | .605416 | .249632 |
| ( 2) | -2.36755 | -1.16652 |
| ( 3) | -.253855E-01 | -.123833E-01 |
| ( 4) | .972571E-01 | -.367050E-03 |
| ( 5) | .233155E-01 | .973857 |
| ( 6) | -1.54035 | .422924E-01 |

ⓔ Beobachter für 75 % Last

MATRIX D DIMENSION 6* 6, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .644879 | .347645E-02 | .249285E-03 | .145656E-02 | .626244E-03 |
| ( 2) | .258845E-01 | .812447 | .997318E-03 | .583190E-02 | .250659E-02 |
| ( 3) | .937840E-08 | .584083E-08 | .985112 | .210853E-08 | .905978E-09 |
| ( 4) | .334885E-02 | .180083E-02 | .128818E-03 | .914685 | .323791E-03 |
| ( 5) | .342837E-02 | .184299E-02 | .131792E-03 | .770975E-03 | .963044 |
| ( 6) | -.320910 | -.179170 | -.132907E-01 | -.767278E-01 | -.332723E-01 |

| | ( 6) |
|---|---|
| ( 1) | -.298060E-01 |
| ( 2) | -.123985 |
| ( 3) | -.464558E-07 |
| ( 4) | -.163848E-01 |
| ( 5) | -.169179E-01 |
| ( 6) | .801320 |

MATRIX E DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | .298060E-01 |
| ( 2) | .123985 |
| ( 3) | .464558E-07 |
| ( 4) | .163848E-01 |
| ( 5) | .169179E-01 |
| ( 6) | .198680 |

MATRIX G DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | -5.39419 |
| ( 2) | 4.95647 |
| ( 3) | .336718E-01 |
| ( 4) | .339071E-02 |
| ( 5) | .348762E-02 |
| ( 6) | -.144794 |

MATRIX $G_z$ DIMENSION 6* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | .802209 | .170866 |
| ( 2) | -2.87832 | -.794705 |
| ( 3) | .529022E-07 | -.751959E-09 |
| ( 4) | .139399 | -.270217E-03 |
| ( 5) | .193427E-01 | .664219 |
| ( 6) | -1.90412 | .399223E-01 |

ⓕ Beobachter für 50 % Last

MATRIX D DIMENSION 6* 6, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .732682 | -.375285E-01 | -.250304E-02 | -.178243E-01 | -.597115E-02 |
| ( 2) | .774063E-01 | .881715 | .436744E-02 | .299095E-01 | .100188E-01 |
| ( 3) | .109525E-02 | .890929E-03 | .987146 | .422822E-03 | .141583E-03 |
| ( 4) | .373523E-02 | .303879E-02 | .210587E-03 | .914804 | .483109E-03 |
| ( 5) | .618672E-02 | .503272E-02 | .348644E-03 | .238859E-02 | .971245 |
| ( 6) | -.175138 | -.143796 | -.103189E-01 | -.696494E-01 | -.235967E-01 |

| | ( 6) |
|---|---|
| ( 1) | .355675 |
| ( 2) | -.604024 |
| ( 3) | -.884211E-02 |
| ( 4) | -.297246E-01 |
| ( 5) | -.497905E-01 |
| ( 6) | .633896 |

MATRIX E DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | -.356675 |
| ( 2) | .604024 |
| ( 3) | .884212E-02 |
| ( 4) | .297246E-01 |
| ( 5) | .497905E-01 |
| ( 6) | .366104 |

MATRIX G DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | -14.5548 |
| ( 2) | 14.3195 |
| ( 3) | .578774E-01 |
| ( 4) | .830665E-03 |
| ( 5) | .141645E-02 |
| ( 6) | .757148E-01 |

MATRIX $G_z$ DIMENSION 6* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | -1.69781 | - 675853 |
| ( 2) | -1.47220 | .663800E-01 |
| ( 3) | .171735E-01 | -.115105E-01 |
| ( 4) | .235170 | .356915E-02 |
| ( 5) | .970094E-01 | .460513 |
| ( 6) | -2.75176 | -.153307 |

ⓖ Beobachter für 30 % Last

MATRIX D DIMENSION 6* 6, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) | ( 3) | ( 4) | ( 5) |
|---|---|---|---|---|---|
| ( 1) | .765450 | -.697121E-02 | -.551901E-03 | -.286318E-02 | -.132976E-02 |
| ( 2) | .161263E-01 | .890913 | .665998E-03 | .345565E-02 | .160476E-02 |
| ( 3) | .100951E-01 | .526621E-02 | .990952 | .216168E-02 | .100376E-02 |
| ( 4) | .401296E-02 | .209373E-02 | .155637E-03 | .952089 | .399124E-03 |
| ( 5) | .221531E-01 | .115570E-01 | .914194E-03 | .474408E-02 | .979465 |
| ( 6) | -.163372 | -.873391E-01 | -.706923E-02 | -.363894E-01 | -.169885E-01 |

| | ( 6) |
|---|---|
| ( 1) | .100730 |
| ( 2) | -.124571 |
| ( 3) | -.797272E-01 |
| ( 4) | -.314466E-01 |
| ( 5) | -.174502 |
| ( 6) | .541808 |

MATRIX E DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | -.100730 |
| ( 2) | .124571 |
| ( 3) | .797272E-01 |
| ( 4) | .314466E-01 |
| ( 5) | .174502 |
| ( 6) | .458192 |

MATRIX G DIMENSION 6* 1, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) |
|---|---|
| ( 1) | -4.62462 |
| ( 2) | 4.64130 |
| ( 3) | .959000E-01 |
| ( 4) | -.513620E-02 |
| ( 5) | -.282979E-01 |
| ( 6) | .305185 |

MATRIX $G_z$ DIMENSION 6* 2, ABTASTZEIT = .500

| | ( 1) | ( 2) |
|---|---|---|
| ( 1) | 1.46693 | -.377357 |
| ( 2) | -5.23596 | -.559887E-01 |
| ( 3) | .148772 | .329881 |
| ( 4) | .524131 | .327464E-02 |
| ( 5) | .326495 | -.405181E-01 |
| ( 6) | -2.49272 | -.125368 |

Anhang S: Regelverhalten des Dampferzeugers mit Zustandsregelung

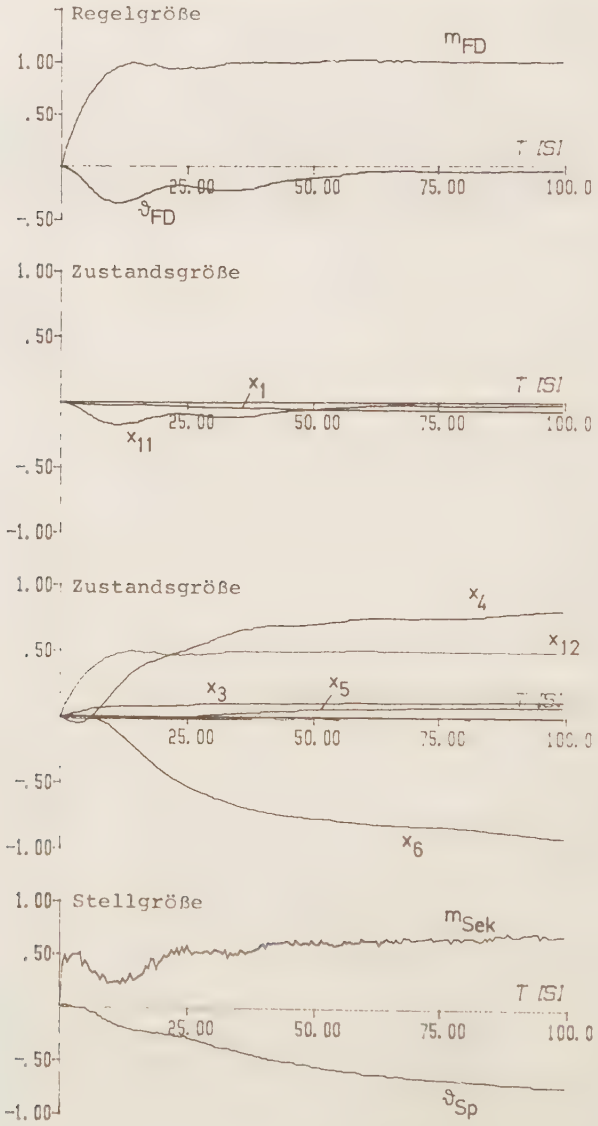



Bild S.1a. Führungsverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Sollwertänderung des Frischdampfdurchsatzes (100 % Last)

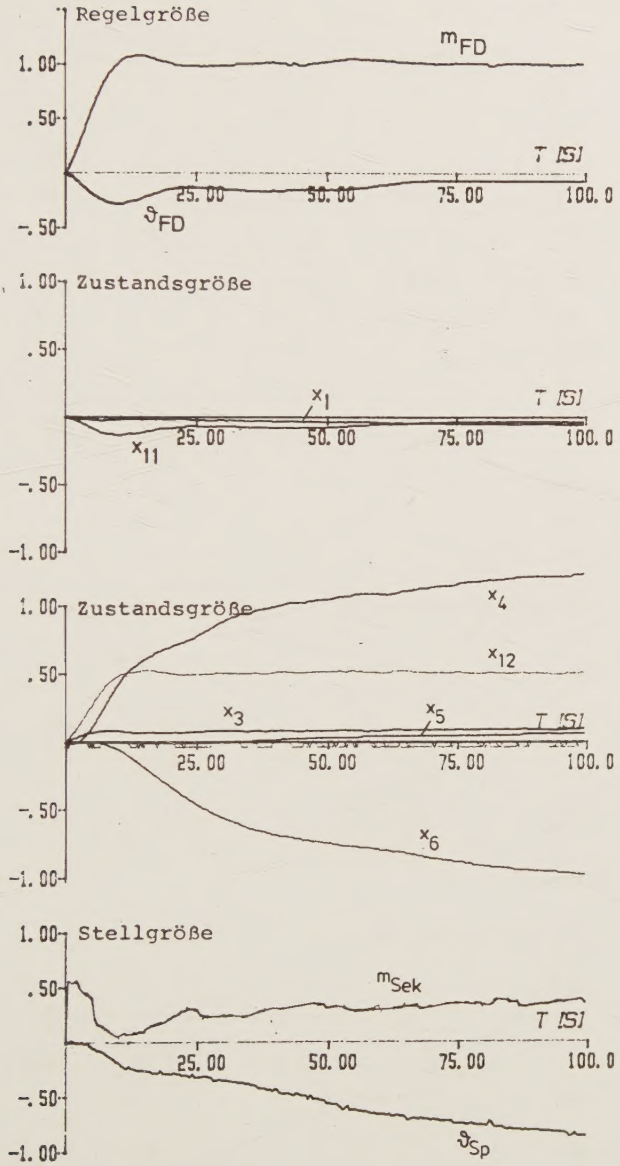



Bild S.1b. Führungsverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Sollwertänderung des Frischdampfdurchsatzes (75 % Last)

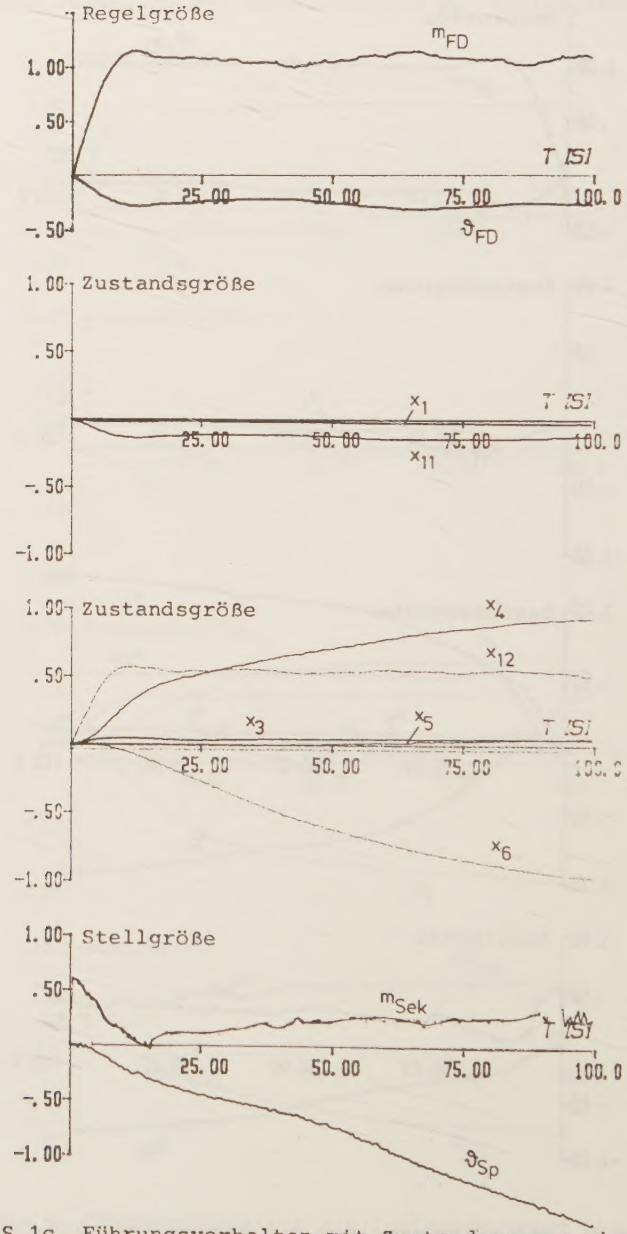



Bild S.1c. Führungsverhalten mit Zustandsmessung bei sprungförmiger Sollwertänderung des Frischdampfdurchsatzes (50 % Last)

Druck: Behr-Fotodruck
Telefon: (0711) 62 61 18
Reinsburgstraße 84
7000 Stuttgart 1